



**TUGAS AKHIR - TL 141584**

**STUDI RANCANG BANGUN DAN TEMPERATUR  
ZONA *CONTINUOUS FURNACE* SINTERING  
MATERIAL FRANGIBLE Cu-5wt%Sn**

**JONAS MARTUA TAMBUNAN**  
**NRP. 2713100057**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si**  
**Dr.Eng Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT - TL 141584**

**STUDY DESIGN OF BODY AND TEMPERATURE  
ZONE CONTINUOUS FURNACE SINTERING  
MATERIAL FRANGIBLE Cu-5wt%Sn**

**JONAS MARTUA TAMBUNAN**  
**NRP. 2713100057**

**Advisor**

**Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si**

**Dr.Eng Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc**

**DEPARTEMENT OF MATERIALS ENGINEERING**  
**Fakulty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2017**

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI RANCANG BANGUN DAN TEMPERATUR  
ZONA *CONTINUOUS FURNACE* SINTERING  
MATERIAL FRANGIBLE Cu-5wt%Sn**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Material Inovatif  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**JONAS MARTUA TAMBUNAN**  
NRP. 2713100057

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si. .... (Pembimbing 1)

Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. .... (Pembimbing 2)



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDI RANCANG BANGUN DAN TEMPERATUR ZONA *CONTINUOUS FURNACE* SINTERING MATERIAL FRANGIBLE Cu-5wt%Sn**

**Nama Mahasiswa** : Jonas Martua Tambunan  
**NRP** : 2713100057  
**Jurusan** : Departemen Teknik Material  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si  
Dr Eng Hosta Ardyananta, S.T., M.Sc

## **Abstrak**

*Material Frangible adalah material yang memiliki kemampuan untuk terdeformasi menjadi fragment fragment kecil ketika menerima beban tertentu. Material frangible telah dikembangkan sebagai material proyektil peluru dengan penggunaan komposit matriks logam Cu-Sn sebagai material pada proyektil peluru frangible yang diproduksi melalui metode metalurgi serbuk mulai dari tahapan mixing, kompaksi, dan sintering. Sintering merupakan proses pembentukan ikatan antar partikel serbuk, sehingga akan menentukan sifat mekanik dari material frangible tersebut. Alat yang digunakan pada proses sintering material frangible adalah batch furnace laboratorium yang terbatas pada jumlah dan laju produksi material tersebut. Sementara untuk masuk pada industri pertahanan dibutuhkan material dengan jumlah yang tidak sedikit. Sehingga dibutuhkan continuous furnace dengan laju produksi yang lebih tinggi dibanding dengan batch furnace. Dari aspek temperatur operasi, temperatur pada continuous furnace harus disesuaikan kembali untuk mencapai temperatur material yang sama pada saat batch furnace. Dengan analisa termal yang dilakukan diperoleh temperatur operasi pada zona pre sinter adalah 250°C dan zona sinter sebesar 300°C. Kemudian dengan perancangan yang telah dibuat, diperoleh laju produksi furnace sebesar 812 butir per jam. Selanjutnya dengan perhitungan energi balance dan desain*

*komponen furnace, diperoleh total daya yang dibutuhkan continuous furnace sintering adalah sebesar 205.93395 kW*

***Kata kunci: Material Frangible, Sintering, Continous Furnace, Temperatur, Energi Balance***



# **STUDY DESIGN OF BODY AND TEMPERATURE CONTINUOUS FURNACE SINTERING MATERIAL FRANGIBLE Cu-5wt%Sn**

**Sttudent's Name** : Jonas Martua Tambunan  
**NRP** : 2713100057  
**Department** : Departemen Teknik Material  
**Advisor** : Dr. Widyastuti, S.Si., M.Si  
Dr Eng Hosta Ardyananta, S.T., M.Sc

## **Abstract**

*Frangible materials are materials that have ability to be deformed into small fragments when they received certain load. Currently frangible material have been developed as a bullet projectile material and used Cu-Sn metal matrix composite as material on frangible bullet projectiles. The Cu-Sn composite is produced through a powder metallurgy method that consisting of mixing, compaction, and sintering steps. Sintering step is an important process in the formation of bonds between powder particles, so it is enough to find the mechanical properties of the frangible material. The tool used in the process of sintering the frangible material is a batch furnace in a laboratory that is limited to the amount and rate of production of the material. In the process of sintering, the tools that used to sinter material is batch furnace which is limited in amount and rate of production frangible materials. Meanwhile, military industry required a lot of frangible material as a projectile. So continuous furnace is more reliable than batch furnace because of the rate production. Then in terms of operating temperature, the temperature at the continuous furnace must be adjusted again to meet the same temperature in batch furnace. By the thermal analysis, the operating temperature in pre sinter zone is 250°C and 300°C for sinter zone. And then, with the design that has been made, obtained the production rate of furnace of 812 bullet per hours. Furthermore, by calculating the energy balance and*

*furnace's components, the total power required for continuous furnace sintering is 205.93395 kW.*

***Keywords: Frangible Materials, Sintering, Continuous Furnace, Temperature, Energy Balance***

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan anugrahNya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **Studi Rancang Bangun dan Temperatur Zona *Continuous Furnace* Sintering Material Frangible Cu-5wt%Sn** .

Penulis menyadari bahwa penelitian ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari orang – orang disekitar lingkungan penulis. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang selalu menyertai penulis hingga menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.
2. Orang tua dan Keluarga yang selalu memberikan dukungan moral maupun moril kepada penulis
3. Ibu Widyastuti selaku Dosen Pembimbing 1 dan Bapak Hosta Ardhyanta selaku Dosen Pembimbing 2 yang selalu menyediakan waktunya mengajar dan membimbing penulis
4. Bapak Agung Purniawan selaku Kepala Departemen Teknik Material.
5. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi atas penulisan dan pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis pun menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Sehingga penulis memohon maaf dan senang hati menerima saran dan kritik yang membangun. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak orang. Amen.

Surabaya 10 Juli 2017

Penulis

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Perumusan Masalah.....	2
1.3    Batasan Masalah.....	3
1.4    Tujuan Penelitian.....	3
1.5    Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1    Material Frangible .....	5
2.2    Komposit Cu-Sn .....	6
2.3    Sintering .....	7
2.4 <i>Furnace</i> .....	9
2.5    Efisiensi <i>Furnace</i> .....	10
2.6    Perpindahan Panas.....	17
2.6.1    Konduksi .....	18
2.6.2    Konveksi.....	23
2.6.3    Radiasi.....	25
2.7    Energi <i>Balance Furnace</i> .....	26
2.8    Komponen Utama <i>Continuous Furnace</i> .....	31
2.8.1    Elemen Pemanas.....	32
2.8.2    Refraktori.....	34
2.8.3    Konveyor .....	36
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	39
3.1    Diagram Alir Penelitian.....	39
3.2    Konseptual Desain.....	40
3.3 <i>Scale Up Batch Furnace ke Continuous Furnace</i> .....	42

3.4	Pengumpulan Data Sifat Fisik Komponen <i>Furnace</i> .....	43
3.5	..... Pra Desain <i>Continuous Furnace</i> Sintering Material Frangible.....	43
3.5.1	Kecepatan Konveyor dan Panjang Zona.....	44
3.5.2	<i>Rate of Production</i> Material Frangible .....	44
3.6	Simulasi dan Analisa Termal Pada Solidwork .....	46
3.7	Evaluasi Pra Desain <i>Continuous Furnace</i> Sintering Material Frangible .....	46
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....		47
4.1	Pra Desain <i>Continuous Furnace</i> Sintering .....	47
4.1.1	Panjang Zona dan Kecepatan Konveyor.....	47
4.1.2	<i>Rate of Production</i> Material Frangible .....	50
4.2	Analisa Termal .....	51
4.2.1	Analisa Termal Material Frangible.....	51
4.2.2	Analisa Termal Pada Dinding <i>Furnace</i> .....	61
4.3	<i>Heat Balance</i> Pada <i>Continuous Furnace</i> Sintering .....	66
4.3.1	<i>Heat Balance</i> Pada Zona Pre-Sinter .....	66
4.3.2	<i>Heat Balance</i> Pada Zona Sinter.....	70
4.4	Perhitungan Desain Komponen <i>Continuos Furnace</i> .....	75
4.4.1	Elemen Pemanas.....	75
4.4.2	Belt Konveyor.....	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		87
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran .....	86
DAFTAR PUSTAKA.....		86
LAMPIRAN.....		93
BIODATA PENULIS.....		113

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Proses dan Bentuk Ikatan <i>Solid State</i> Sintering .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Proses <i>Liquid</i> Sintering .....	9
<b>Gambar 2.3</b> Pengelompokan Jenis – Jenis <i>Furnace</i> .....	10
<b>Gambar 2.4</b> Prinsip Kerja <i>Furnace</i> .....	10
<b>Gambar 2.5</b> Perpindahan Panas Pada Dinding <i>Furnace</i> .....	12
<b>Gambar 2.6</b> Mekanisme <i>Waste - Gas Losses</i> .....	16
<b>Gambar 2.7</b> Mekanisme Perpindahan Panas Secara Konduksi..	18
<b>Gambar 2.8</b> (a) Panas Yang Hilang Dari Dinding Sebagai Fungsi Temperatur (b) Panas Yang Hilang Dari Dinding Sebagai Fungsi <i>Thermal Resistance</i> Dinding Komposit .....	21
<b>Gambar 2.9</b> Maksimum Dan Minimum Temperatur Muatan Dan –Ln Ys Atau –Ln Yc Sebagai Fungsi Waktu Pemanasan Dengan Temperatur Sumber Panas Yang Konstan.....	22
<b>Gambar 2.10</b> Perpindahan Panas Secara Konveksi .....	24
<b>Gambar 2.11</b> Perpindahan Panas Secara Radiasi.....	26
<b>Gambar 2.12</b> Analisa Panas Pada Continuous Furnace .....	28
<b>Gambar 2.13</b> Perpindahan Panas Panas Pada Refraktori atau Insulasi.....	35
<b>Gambar 2.14</b> Sifat – Sifat Yang Dibutuhkan Pada Pemilihan Refraktori.....	35
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Perancangan.....	40
<b>Gambar 3.2</b> Konseptual Desain <i>Continuous Furnace</i> Sintering	40
<b>Gambar 3.3</b> Proses Flow Diagram Sintering .....	42
<b>Gambar 3.4</b> Susunan Load Tampak Samping.....	45
<b>Gambar 3.5</b> Susunan Muatan Tampak Atas.....	45
<b>Gambar 4.1</b> Drawing <i>Continuous Furnace</i> Sintering .....	49
<b>Gambar 4.2</b> Susunan Muatan Pada <i>Fixture</i> .....	50
<b>Gambar 4.3</b> Posisi Material Frangible Pada Analisa Temperatur .....	53
<b>Gambar 4.4</b> Posisi Sensor Temperatur Pada Material Frangible Untuk Analisa Temperatur.....	52

<b>Gambar 4.5</b>	Gambar Penampang Material Frangible Pada Zona Pre Sinter (a,b)Temperatur 225°C (c,d)Temperatur 250°C (e,f)Temperatur 275°C .....	54
<b>Gambar 4.6</b>	Distribusi Temperatur Pada Material Frangible (a) Temperatur 225°C (b)Temperatur 250°C (c)Temperatur 275°C.....	55
<b>Gambar 4.7</b>	Gambar Penampang Material Frangible Pada Zona Pre Sinter (a,b)Temperatur 225°C (c,d)Temperatur 250°C (e,f)Temperatur 275°C .....	58
<b>Gambar 4.8</b>	Distribusi Temperatur Pada Material Frangible (a) Temperatur 300°C (b)Temperatur 400°C (c)Temperatur 500°C.....	59
<b>Gambar 4.9</b>	Penampang Susunan Material Insulasi Pada Dinding Furnace dan Posisi Sensor Temperatur (a)5.5.10 (b)5.10.5 (c)10.5.5 .....	62
<b>Gambar 4.10</b>	Simulasi Pada Dinding <i>Furnace</i> Zona Pre Sinter (a)5.510 cm (b)5.10.5 cm (c)10.5.5 cm.....	63
<b>Gambar 4.11</b>	Distribusi Temperatur Pada Dinding <i>Furnace</i> Zona Pre Sinter.....	64
<b>Gambar 4.12</b>	Simulasi Pada Dinding <i>Furnace</i> Zona Sinter (a)5.510 cm (b)5.10.5 cm (c)10.5.5 cm.....	64
<b>Gambar 4.13</b>	Distribusi Temperatur Pada Dinding <i>Furnace</i> Zona Sinter .....	65
<b>Gambar 4.14</b>	Neraca Energi Zona Pre Sinter.....	66
<b>Gambar 4.15</b>	Neraca Energi Zona Sinter.....	71
<b>Gambar 4.16</b>	Grafik Desain Perhitungan Jarak Antar Elemen Pemanas.....	77
<b>Gambar 4.17</b>	Perancangan Elemen Pemanas <i>Continuous Furnace</i> Sintering .....	81
<b>Gambar 4.18</b>	Desain Belt Konveyor.....	85



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Nilai Konduktifitas Termal Material .....	19
<b>Tabel 2.2</b> Nilai Koefisien Konveksi Material .....	24
<b>Tabel 2.3</b> Nilai Emisivitas Material .....	26
<b>Tabel 2.4</b> Data Sifat Elemen Pemanas.....	34
<b>Tabel 3.1</b> Zona Pada <i>Continuous Furnace</i> Sintering.....	45
<b>Tabel 4.1</b> Perbandingan Waktu Pemanasan Tiap Zona .....	48
<b>Tabel 4.2</b> Panjang Tiap Zona dan Kecepatan Konveyor .....	48
<b>Tabel 4.3</b> Jumlah Material Muatan Pada Masing – Masing Zona .....	51
<b>Tabel 4.4</b> <i>Input</i> Nilai Pada Simulasi .....	53
<b>Tabel 4.5</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 225°C .....	56
<b>Tabel 4.6</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 250°C .....	56
<b>Tabel 4.7</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 275°C.....	56
<b>Tabel 4.8</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 300°C.....	60
<b>Tabel 4.9</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 400°C .....	60
<b>Tabel 4.10</b> Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 500°C.....	60
<b>Tabel 4.11</b> <i>Input</i> Nilai Pada Simulasi .....	62
<b>Tabel 4.12</b> Perhitungan <i>Heat Input</i> Zona Pre - Sinter .....	66
<b>Tabel 4.13</b> Perhitungan <i>Heat Load</i> Zona Pre - Sinter.....	67
<b>Tabel 4.14</b> Perhitungan <i>Heat Belt Loss Conveyor</i> Zona Pre - Sinter .....	68
<b>Tabel 4.15</b> Perhitungan <i>Wall Loss</i> Zona Pre - Sinter.....	68
<b>Tabel 4.16</b> Perhitungan <i>Heat Open Loss</i> Zona Pre - Sinter.....	69
<b>Tabel 4.17</b> Perhitungan <i>Heat Fixture Loss</i> Zona Pre - Sinter.....	70
<b>Tabel 4.18</b> Perhitungan <i>Heat Input</i> Zona Sinter .....	71
<b>Tabel 4.19</b> Perhitungan <i>Heat Load</i> Zona Sinter .....	72
<b>Tabel 4.20</b> Perhitungan <i>Heat Belt Loss Conveyor</i> Zona Sinter ..	72

**Tabel 4.21** Perhitungan *Heat Wall Loss* Zona Sinter.....73

**Tabel 4.22** Perhitungan *Heat Open Loss* Zona Sinter.....74

**Tabel 4.23** Perhitungan *Heat Fixture Loss* Zona Sinter.....74



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Material Frangible adalah material yang memiliki kemampuan untuk terdeformasi menjadi fragmen - fragmen kecil ketika menerima beban tertentu. Sekarang ini aplikasi material frangible telah dikembangkan sebagai material proyektil peluru dengan penggunaan komposit matriks logam Cu-Sn sebagai material pada proyektil peluru frangible. Sehingga akan dihasilkan peluru frangible yang memiliki keunggulan ramah lingkungan dan minim *backsplash* atau *richocet* dibanding dengan material proyektil peluru yang konvensional.

Material frangible Cu-Sn tersebut diproduksi melalui metode metalurgi serbuk yang terdiri dari tahapan *mixing*, kompaksi, dan sintering. Tahapan sintering merupakan proses penting dalam pembentukan ikatan antar partikel serbuk, sehingga cukup menentukan sifat mekanik dari material frangible tersebut.

Alat yang digunakan pada proses sintering material frangible adalah *batch furnace* pada laboratorium yang terbatas pada jumlah dan laju produksi material tersebut. Pada proses sintering menggunakan *batch furnace*, laju produksi material frangible yang bisa dicapai adalah 30 butir per 4 jam. Sementara untuk masuk pada industri pertahanan dibutuhkan material dengan jumlah yang tidak sedikit. Seperti menurut *Global Security* bahwa kebutuhan peluru frangible setiap tahunnya mencapai 300 sampai 400 juta butir per tahun. Kemudian berdasarkan perancangan produksi material frangible menurut Mifta (2015), dibutuhkan laju produksi peluru sebesar 6250 butir per jam. Oleh karena itu diperlukan *furnace* dengan desain yang memenuhi kebutuhan produksi material frangible. Selain hal mengenai desain dan laju produksi material frangible tersebut, temperatur *furnace* yang digunakan pada *continuous furnace* nantinya tentu tidak akan sama dengan temperatur sintering pada *batch furnace*, dikarenakan proses *continuous furnace* kehilangan panas akan lebih banyak dibandingkan dengan *batch furnace*. Sehingga diperlukan



temperatur operasi furnace yang baru berdasarkan desain yang dibuat.

Pada disertasi milik Rahdakrishnan Purushothaman dilakukan evaluasi dan peningkatan terhadap model *continuous furnace* dengan menggunakan metode *Computerized Heat Treatment Planning System (CHT)* untuk menentukan profil temperatur dari muatan dalam *furnace*. Metode penelitian dibuat berdasarkan eksperimen dan pengembangan teori yang ada termasuk desain jenis *heat treat furnace*. Evaluasi desain atau model *furnace* dengan metode CHT ini dibagi menjadi tiga yaitu dengan model *energi balance*, model perpindahan panas, dan model kontrol *furnace*. Kemudian dari analisis dan diskusi dengan para praktisi yang telah dilakukan, diperoleh tiga masalah utama dalam suatu desain sistem *furnace* yaitu panas yang hilang ketika memasukkan (*charge*) muatan dan mengeluarkan (*discharge*) muatan akibat daerah yang terbuka. Sehingga dengan CHT diperoleh profil temperatur yang baru dengan mengatur kembali nilai panas yang hilang akibat daerah atau pintu yang terbuka berdasarkan pengaturan jadwal buka tutup pintu dan beberapa asumsi lainnya yang paling sesuai atau mendekati desain yang dibuat.

Sehingga untuk menjawab permasalahan sebelumnya, pada studi kali ini akan dilakukan perancangan desain *continuous furnace* sintering yang optimum dari segi temperatur dan rancang bangunnya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana menganalisis temperatur operasi *continuous furnace* sintering material frangible yang tepat?
2. Bagaimana merancang desain *continuous furnace* sintering material frangible yang optimum?



### 1.3 Batasan Masalah

Agar didapat hasil akhir yang baik dan sesuai dengan tujuan perancangan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada perancangan ini adalah sebagai berikut:

1. Lingkungan yang *oxidative* dianggap tidak berpengaruh terhadap material frangible.
2. Temperatur pada setiap zona dianggap merata.
3. Susunan muatan dalam *furnace* dianggap teratur.
4. Nilai termal material tidak berpengaruh terhadap temperatur.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis temperatur operasi yang tepat pada setiap zona dalam *continuous furnace* sintering material frangible.
2. Merancang desain *continuous furnace* sintering material frangible yang optimum.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rancangan *continuous furnace* sintering material frangible yang optimal. Rancangan yang dihasilkan dapat digunakan sebagai acuan dalam pembuatan atau manufaktur *continuous furnace* sintering material frangible tersebut. Selain itu penelitian ini juga mampu digunakan sebagai inovasi pengembangan teknologi *furnace* dalam dunia industri.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Material Frangible**

Pada proses pengembangannya, material frangible dapat diaplikasikan sebagai material proyektil peluru. Proyektil peluru frangible ini didesain agar dapat terpecah menjadi beberapa bagian ketika membentur tembok atau permukaan lain yang keras untuk mencegah terjadinya pemantulan. Perkembangan peluru frangible tergolong masih baru, hal ini berangkat dari penggunaan proyektil standar yang digunakan sesuai dengan jarak tembakan dan kebutuhan perlindungan pribadi. Dengan munculnya taktik penyelamatan sandera yang lebih modern di tahun 1970-an dan 1980-an, lembaga militer dan polisi mulai mencari cara untuk meminimalkan resiko dari penggunaan peluru konvensional. Maka salah satu solusi yang dapat diterima adalah penggunaan peluru frangible.

Peluru frangible tidak terbuat dari timbal (proyektil) yang dilapisi tembaga (kelongsong), tetapi dari komposit yang keduanya ditekan dengan tekanan tinggi atau direkatkan dengan menggunakan perekat secara bersamaan. Peluru frangible terbentuk dari serbuk logam seperti tembaga, timah, tungsten, besi, bismuth dan baja, beberapa jenis peluru juga ditambahkan polimer sebagai pengikat. Material tersebut dikompres ke dalam bentuk yang diinginkan. Untuk meningkatkan kinerjanya maka peluru komposit ini juga dilakukan proses sintering. (Mikko, 2000)

Secara umum densitas dari peluru frangible menurut Hansen (2008) harus memiliki densitas dengan kisaran 1,75 g/cc–8,25 g/cm<sup>3</sup> Sedangkan untuk peluru frangible yang sesuai dengan karakteristik uji tembak memiliki densitas dengan kisaran 7,1–8,5 g/cm<sup>3</sup>. Pada penelitian yang dilakukan oleh S. Kruachatturat dkk (2009) menyebutkan bahwa kekuatan tekan yang harus dimiliki oleh peluru frangible berada pada kisaran 31 – 310 MPa. Dengan nilai kekerasan permukaan pada kisaran 54 – 119 HV. Pada tabel 2.1 ditampilkan data karakteristik peluru frangible produk dari Sinterfire dan SR. Berdasarkan kedua produk tersebut trend dari



pengembangan peluru frangible saat ini adalah dengan menggunakan material komposit.

## 2.2 Komposit Cu-Sn

Tembaga digunakan sebagai material alternatif pengganti Pb dalam pembuatan proyektil karena termasuk material *non-toxic* dan tembaga juga merupakan material yang lunak sehingga dapat menjadi pelumas ketika menjadi peluru pada penggunaan senapan (Anil V. Nadkarni, 2003). Penambahan unsur timah (Sn) dapat menambah kekuatan dari matrix tembaga (Cu) sehingga akan mempengaruhi modulus elastisitas dari komposit Cu-Sn (Yokota, 2012). Timah memiliki *melting point* yang rendah sehingga dianjurkan untuk digunakan sebagai pengikat (*binder*). Karena timah cair cenderung lebih mudah membasahi serbuk tembaga. Sistem ini akan mampu membentuk permukaan partikel tembaga yang rapuh sehingga dapat meningkatkan *frangibility* dari peluru (Nadkarni, 2003).

Untuk mengetahui sifat komposit selain dengan pengambilan data pada eksperimen, juga bisa didapatkan secara teori. Dengan menggunakan *Rule of Mixture (ROM)* yang dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \dots\dots\dots \text{pers 2.1}$$

Keterangan:

- $\rho_c$  = densitas komposit
- $\rho_m$  = densitas matriks
- $\rho_f$  = densitas penguat
- $V_m$  = fraksi volume matriks
- $V_f$  = fraksi volume penguat

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots \text{pers 2.2}$$

Keterangan :

- $\rho$  = densitas
- $m$  = massa
- $v$  = volum





Dengan menggunakan rumus densitas (2.2) maka akan diperoleh fraksi massa.

Dengan perumusan berikut,

$$m_m = a \cdot m_c \text{ dan } m_f = b \cdot m_c \dots\dots\dots \text{pers 2.3}$$

Keterangan :

- $m_m$  = massa matrik
- $m_f$  = massa penguat
- $m_c$  = massa komposit
- $a$  = fraksi massa matrik
- $b$  = fraksi massa penguat

Massa serbuk yang terdiri dari massa matriks dan massa *reinforced* dibutuhkan untuk pembuatan komposit dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut.

- Massa matriks

$$m_m = a \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot V_c \dots\dots\dots \text{pers 2.4}$$

- Massa *reinforced*

$$m_f = b \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_f}{a \cdot \rho_f + b \cdot \rho_m} \cdot V_c \dots\dots\dots \text{pers 2.5}$$

Keterangan :

- $V_c$  = volum komposit

## 2.3 Sintering

Sintering merupakan proses pemanasan produk awal hasil kompaksi pada suatu temperatur yang dilakukan untuk membentuk suatu ikatan antar partikel melalui mekanisme difusi atom sehingga kekuatan produk awal meningkat. Adapun parameter proses sintering yang perlu diperhatikan sebagai berikut (German, 1984):

1. Temperatur sintering, dengan temperatur sintering yang tinggi akan terjadi shrinkage yang lebih besar, pertumbuhan butir, dan biaya yang mahal.
2. Ukuran partikel serbuk, semakin halus serbuk maka semakin cepat laju sintering, dan level impuritas yang semakin baik.

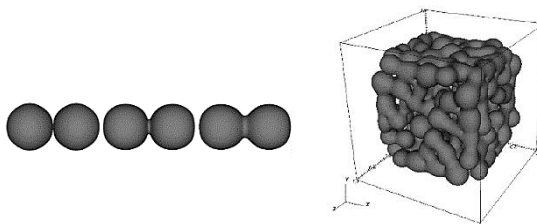


3. Waktu sintering, semakin lama proses penyinteran berlangsung maka diameter serbuk semakin besar. Waktu sintering juga menentukan densifikasi tetapi tidak terlalu berpengaruh dibandingkan dengan temperatur sintering.
4. Green density, densitas meningkat akan mengakibatkan terjadinya penyusutan yang kecil, terbentuk porositas yang lebih kecil dan diperoleh dimensi yang uniform.
5. Tekanan kompaksi, semakin tinggi tekanan kompaksi akan memperbanyak dislokasi sehingga mempercepat sintering. Selain itu produk awal kompaksi yang ditekan pada tekanan rendah akan menyusut atau *shrinkage* lebih besar daripada produk awal yang ditekan dengan tekanan tinggi karena tekanan kompaksi mengurangi porositas dan menaikkan densitas produk awal.

Proses sintering kemudian dibagi menjadi dua jenis yaitu Solid State Sintering dan Liquid State Sintering.

a. Solid State Sintering

Pada proses ini terjadi pembentukan ikatan antar partikel padat ketika dipanaskan. Ikatan ini menurunkan energi permukaan dengan removing free surface, dengan mengeliminasi grain boundary melalui pertumbuhan butir. Sehingga ketika sintering, terjadi fenomena penyusutan dan pertumbuhan butir seperti **Gambar 2.1**

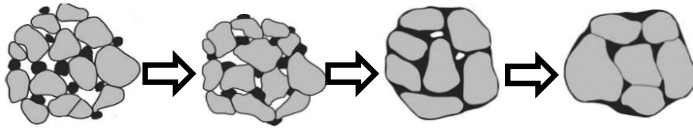


**Gambar 2.1** Proses dan Bentuk Ikatan *Solid State Sintering*  
(Daniel, 2012)



a. **Liquid Phase Sintering**

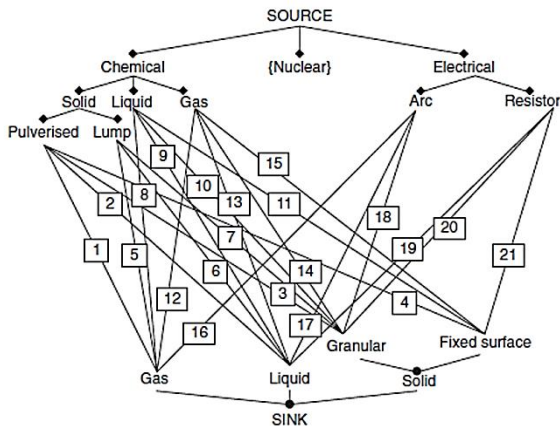
Proses sintering ini melibatkan fasa cair pada temperatur tertentu. Syarat material logam pada proses ini adalah material tersebut dapat membentuk lapisan di sekeliling fasa padatan seperti **Gambar 2.2** dan cairan logam harus memiliki kelarutan terhadap fasa padat.



**Gambar 2.2** Proses *Liquid* Sintering (Sumber Daniel, 2012)

## 2.4 **Furnace**

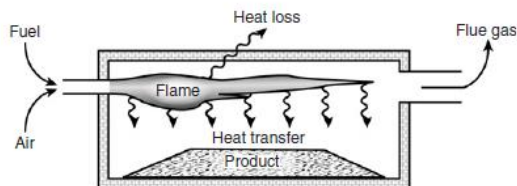
*Furnace* menurut kamus Oxford merupakan suatu sistem tertutup yang digunakan untuk pembakaran dengan menggunakan api pada logam atau air. Prinsip dan tujuan utama pada *furnace* adalah untuk mencapai temperatur proses yang lebih tinggi daripada yang dapat dicapai pada udara terbuka. Meskipun beberapa proses dapat menggunakan sistem udara terbuka, namun efisiensinya akan sangat jauh lebih rendah, kemudian pemakaian bahan bakar akan jauh lebih besar dan kontrol proses akan cukup sulit. *Furnace* dapat digunakan untuk mewujudkan reaksi kimia yang besar atau beberapa proses secara fisik sederhana, seperti annealing atau drying. Salah satu tantangan yang dihadapi dalam mendesain *furnace* adalah menentukan langkah penentuan laju kritis dan memastikan bahwa desain yang dibuat bekerja seefektif dan seefisien mungkin. Sehingga *furnace* dengan efisiensi secara kerja dan ekonomis yang besar perlu dikembangkan lagi. Sementara untuk membagi jenis jenis *furnace*, hampir tidak terbatas jumlah atau cara pengklasifikasian *furnace*, misalnya berdasarkan bentuk, industri, produk, dan lain lain. Namun cara sederhana untuk mengklasifikasikan *furnace* dapat dibuat berdasarkan konsep perpindahan panas dari sumber panas yang digunakan dan jenis panas yang hilang seperti pada **Gambar 2.3**.



**Gambar 2.3** Pengelompokan Jenis – Jenis *Furnace* (Sumber: *Industrial and Process Furnace*, 2008)

## 2.5 Efisiensi *Furnace*

*Furnace* – *furnace* tersebut digunakan dalam berbagai aplikasi yang berhubungan dengan temperatur tinggi. Di dalam dunia industry, *furnace* digunakan diberbagai industry seperti: pembuatan ceramic, dan bata, industry semen dan kapur, pembuatan gelas, peleburan biji logam, pemurniaan logam, flash dan fluid bed *furnace*, proses fisik pada logam, incinerator atau recovery resource, reducing atmosphere, pemurniaan minyak dan *furnace* petrokimia (*Industrial and Process Furnace*: 2008).



**Gambar 2.4** Prinsip Kerja *Furnace* (Sumber: *Industrial and Process Furnace*: 2008)



Prinsip kerja keseluruhan *furnace* secara sederhana ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Panas akan dibebaskan oleh pembakaran bahan bakar dan oksigen, atau dari energi listrik dan beberapa perpindahan panas kepada produk. Panas yang sisa akan lepas/meninggalkan bersamaan dengan gas sisa dan melalui pintu yang terbuka atau pada permukaan dinding *furnace*. Sehingga efisiensi *furnace* dapat dihitung dengan:

$$Q = m C_p (t_1 - t_2)$$

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_s} \dots \dots \dots \text{pers 2.6}$$

Keterangan:

$\eta$  = *Furnace Eficiency*

$Q_p$  = Panas yang diterima produk akhir

$Q_s$  = Panas yang diberikan dari sumber panas

$m$  = Massa material yang dipanaskan

$C_p$  = Spesifik Heat material yang dipanaskan

$t_1$  = Temperatur akhir dari material

$t_2$  = Temperatur awal dari material

Metode perhitungan efisiensi di atas dinamakan perhitungan *Direct Method* atau perhitungan secara langsung. Metode yang selanjutnya adalah metode *Indirect Method*. Metode ini menghubungkan antara panas yang diberikan dengan panas panas yang hilang dari komponen komponen *furnace* tersebut. Sebagaimana Hukum Termodinamika II, dimana energi yang diberikan tidak akan seratus persen diubah menjadi produk atau ada energi yang terbuang ke lingkungan. Hal itu juga berlaku pada sistem pembakaran *furnace*. Panas yang hilang meliputi:

1. *Stored Heat Loss*

Struktur *furnace* yang terbuat dari logam pasti terkena panas atau mau tidak mau harus dipanaskan sehingga temperatur produk yang didalam *furnace* dapat terdistribusi secara merata. Panas tersebut akan tetap disimpan dalam stuktur *furnace* tadi, sampai *furnace* tersebut dimatikan, kemudian akan menyesuaikan dengan temperatur lingkungan sekitar nya. Dengan demikian ada

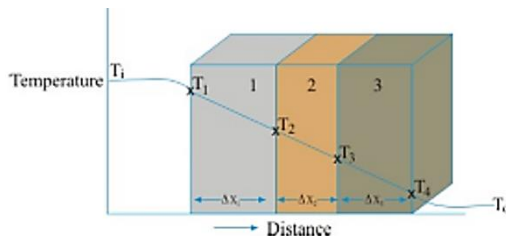


panas yang hilang atau panas yang disimpan pada struktur *furnace* tadi dari sumber panas yang diberikan, yang mana panas yang disimpan tersebut tidak mempengaruhi hasil atau produk. Panas yang disimpan dalam material bergantung pada massa dan panas laten, kapasitas panas, dari muatan yang dipanaskan. Jika dilihat dari factor factor tersebut, pengaruh paling besar dipengaruhi oleh unsur intrinsic dari material tersebut. Sehingga untuk meningkatkan panas yang tersimpan akibat pengaruh *furnace* adalah dengan:

- Membuat sistem insulasi yang baik, dengan efisiensi yang tinggi.
- Menggunakan sistem rekuperator dan regenerator untuk meningkatkan panas selain dari sumber panas.
- Menghitung jumlah muatan yang efisien dan efektif dalam *furnace* tersebut.

## 2. Wall Losses

Panas yang hilang pada dinding *furnace* diakibatkan karena adanya fenomena perpindahan panas secara konduksi melalui dinding, atap, dan lantai *furnace* karena adanya perbedaan temperatur *furnace* dan lingkungan seperti **Gambar 2.5**. Sementara panas yang hilang atau keluar dari dinding tersebut akan terbangun atau dibawa oleh udara, sehingga untuk memperoleh panas yang dituju pada produk, energi yang diberikan haruslah ditambahi.



**Gambar 2.5** Perpindahan Panas Pada Dinding *Furnace* (Sumber: *Refractory Design in Furnace*)



Perpindahan panas pada dinding *furnace* ini terjadi secara konveksi kemudian dalam dinding *furnace* terjadi secara konduksi, dan terakhir serara radiasi. Sehingga jika kita melihat dari persamaan ketiga perpindahan panas tersebut dapat dikatakan bahwa beberapa faktor yang mempengaruhi panas yang hilang pada dinding *furnace* meliputi emissivitas dinding, konduktivitas termal material dinding, ketebalan dinding, dan apakah *furnace* tersebut dioperasikan secara kontinuus atau bertahap. Sehingga solusi yang ditawarkan untuk mengurangi panas yang hilang akibat dinding *furnace* adalah dengan memodifikasi perpindahan panas dengan mengubah:

- a. Temperatur dinding *furnace*, dengan tingginya temperatur dinding *furnace*, panas yang hilang akan semakin tinggi.
  - b. Temperatur luar *furnace*, dengan semakin rendahnya temperatur lingkungan, panas yang hilang semakin tinggi.
  - c. Arah permukaan, menghadap kebawah panas yang hilang lebih rendah, sementara permukaan keatas panas yang hilang lebih tinggi.
  - d. Kecepatan angin, dengan semakin cepat kecepatan angin yang melalui *furnace* maka panas yang hilang semakin tinggi pula.
  - e. Nilai emisiviti, nilai emisiviti yang besar akan mengakibatkan panas yang hilang semakin tinggi.
3. *Material Handling Losses*
- Kebanyakan peralatan dalam *furnace*, digunakan peralatan untuk memindahkan material baik kedalam atau keluar ruang pembakaran. Hal ini dapat mengakibatkan adanya panas yang hilang pula. Karena adanya panas yang diterima oleh material handling tadi. Solusi yang dapat digunakan untuk mengurangi panas yang hilang akibat material handling adalah:



- a. Mengoptimasikan desain dari sistem material desain untuk mengurangi berat.
- b. Menggunakan jenis material yang mempunyai kekuatan yang lebih tinggi, namun memiliki berat yang ringan.
- c. Menggunakan sistem material yang penuh atau sederhana untuk menghindari pemanasan dan pendinginan secara berkali kali.

#### 4. *Cooling Media Losses*

Air atau udara pendingin digunakan untuk melindungi komponen komponen *furnace* seperti roll, bearing, dan pintu pada daerah temperatur tinggi pada *furnace*. Akibatnya ada panas yang hilang akibat perlindungan ini. Solusi yang dapat digunakan untuk untuk mengurangi panas yang hilang akibat media pendingin ini adalah (*Energy Saving Methods*):

- a. Mengurangi atau menghilangkan penggunaan pendingin komponen yang menggunakan air, dengan menggunakan material komponen yang tahan dengan temperatur tinggi.
- b. Kenaikan temperatur air yang keluar sedikit.
- c. Menghilangkan atau meminimalisir scale pada tube bagian dalam saluran air.
- d. Meningkatkan kecepatan aliran air dalam pipa.

#### 5. Radiasi akibat sistem yang terbuka

*Furnace* biasanya bekerja pada temperatur tinggi misalnya diatas  $540^{\circ}\text{C}$ , panas yang hilang ini akan secara signifikan hilang dari sistem *furnace*. Untuk membuat *furnace* dalam kondisi yang setimbang, maka energy yang diberikan harus diperbesar lagi. Dengan terbuka nya sistem *furnace*, maka tentu adanya nya fenomena radiasi dari panas dalam *furnace* dengan temperatur di lingkungan. Berdasarkan rumus sederhana laju perpindahan panas secara radiasi,





perpindahan panas akan terjadi jika ada perbedaan temperatur antara surface dengan lingkungannya melalui luas penampang yang dilalui. Namun perpindahan radiasi, ada gaya elektromagnetik yang menyebabkan perpindahan panas tersebut. Hal tersebut dipengaruhi oleh emisivitas permukaan sumber panas. Sehingga jika dihubungkan dengan panas yang hilang akibat radiasi, maka akan didapatkan panas hilang dengan jumlah yang cukup banyak.

$$Q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \dots \dots \dots \text{pers 2.7}$$

Panas yang cukup banyak itu diperoleh dari nilai temperatur yang berpangkat 4 pada perhitungannya. Kemudian jika perbedaan temperatur *furnace* dengan lingkungan cukup besar, maka kerugian panas pun akan semakin besar. Oleh karena itu untuk mengurangi panas yang hilang akibat perpindahan panas itu perlu dilakukan dengan (Industrial Technologies Program):

- a. Menghilangkan area yang terbuka pada *furnace*, atau tetap ada area yang terbuka, namun dengan waktu buka yang singkat. Pengecualian untuk *continuous furnace* yang memang harus memiliki area yang terbuka pada proses produksinya sebagai masuk dan keluarnya muatan.
- b. Mengecilkan luas penampang A atau area yang terbuka, sehingga panas yang hilang cukup tereduksi. Metode lainnya adalah menggunakan sistem perpanjangan atau terowongan.
- c. Menggunakan sistem tirai pada area yang terbuka dengan material ceramic yang fleksibel, sehingga panas yang berpindah dapat dikurangi.
- d. Menggunakan material dengan emisivitas yang sekecil mungkin, namun dengan efisiensi ekonomi yang telah dipertimbangkan. Material dengan

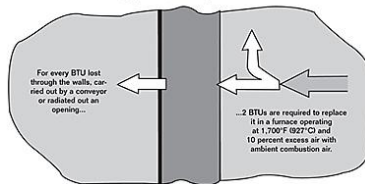


emisivitas yang rendah contohnya adalah Polished Copper atau Polished Stainless Steel

#### 6. *Waste-gas Losses*

Gas buang merupakan panas yang tidak dapat dihilangkan dari hasil pembakaran dalam *furnace*. Hal ini mengakibatkan panas mengalir dari sumber temperatur tinggi ke penerima temperatur yang lebih rendah. Secara sederhana gas buang atau sisa ini merupakan panas yang lebih. Suatu perpindahan energi memiliki batasan seberapa besar energi yang dipindahkan. Sehingga ketika suatu energi tersebut telah mencapai batasannya, maka energi yang belum dikonversi atau digunakan tetapi sudah diberikan akan hilang atau keluar lewat saluran gas buang seperti mekanisme pada **Gambar 2.6**.

Flue Gas Losses Multiply Wall, Conveyor and Radiation Losses



**Gambar 2.6** Mekanisme *Waste - Gas Losses* (Sumber: *Waste Heat Recovery*, 2009)

Untuk mengurangi panas yang hilang ini dapat digunakan alternatif seperti:

- Mengurangi temperatur gas keluaran dari saluran buang.
- Mengurangi volume gas buang dengan memperhitungkan perbandingan antara bahan bakar dengan oksigen untuk mengendalikan konsumsi bahan bakar.
- Menggunakan udara pembakaran yang kaya dengan oksigen, dengan meningkatnya persentase kandungan oksigen volume gas buang akan lebih



sedikit kemudian dapat menghemat bahan bakar pula.

- d. Meminimalisir adanya celah atau lubang sebagai saluran panas keluar, sehingga perlu adanya sistem monitoring kebocoran.
- e. Selain untuk mengurangi panas yang hilang dari gas buang tersebut, panas buang dari gas buang tersebut dapat digunakan kembali (*recovery*) sehingga meningkatkan efisiensi *furnace* itu kembali. Ada empat cara yang dapat digunakan untuk menggunakan panas tersebut kembali (*Waste Heat Recovery*, 2009):
  - Recuperator, sistem *heat exchanger* dengan mekanisme siklik
  - Regenerator
  - *Waste Heat Boiler*
  - *Direct Recovery* terhadap muatan

Total kehilangan panas akan dikurangi seratus persen, kemudian diperoleh persentase efisiensi akhir dari *furnace* secara keseluruhan. Jenis – jenis panas yang hilang ini dapat digunakan juga pada perhitungan energi *batch*, sebagai indikator bahwa sistem yang digunakan pada *furnace* tersebut berjalan sesuai desain yang digunakan.

## 2.6 Perpindahan Panas

Dalam sistem pembakaran dalam *furnace* tidak lepas dari yang namanya panas yang digunakan untuk memanasi material sesuai dengan kebutuhannya. Salah satu analisa yang diperlu dikembangkan untuk meningkatkan kinerja *furnace* adalah perpindahan panas dalam *furnace* tersebut. Secara umum perpindahan panas terjadi dengan tiga cara atau mekanisme, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.



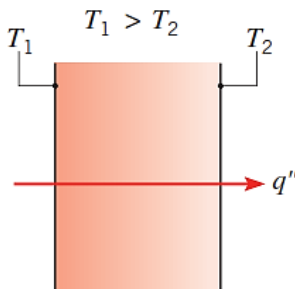
### 2.6.1 Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah ( $T_1$  ke  $T_2$  pada **Gambar 2.7**) dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum. Persamaan dasar laju perpindahan panas secara konduksi menggunakan Hukum Fourier:

$$q = -kA \frac{dT}{dX} \dots \dots \dots \text{pers 2.8}$$

Keterangan:

- Q = Laju Perpindahan Panas (kj/det,W)
- K = Konduktifitas Termal (W/m°C)
- A = Luas Penampang (m<sup>2</sup>)
- dT = Perbedaan Temperatur (°C, °F)
- dX = Perbedaan Jarak (m)



**Gambar 2.7** Mekanisme Perpindahan Panas Secara Konduksi  
(Incropera, 2008)

$dT/dX$  merupakan gradient temperatur ke arah perpindahan kalor. Sementara konstanta “k” merupakan konduktifitas atau kehantaran termal benda tersebut. Nilai “k” akan bergantung pada materialnya seperti pada **Tabel 2.1**. Tanda negatif disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. Berdasarkan rumusan di atas



maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktifitas termal berbagai bahan.

**Tabel 2.1** Nilai Konduktifitas Termal Material (Holman, 2010)

Bahan	Konduktifitas Termal	
	W/m°C	Btu/h.ft.°F
Perak (murni)	410	237
Tembaga (murni)	385	223
Aluminium (murni)	202	117
Nikel (murni)	93	54
Besi (murni)	73	42
Baja Karbon 1% C	43	25
Timbal (murni)	35	20,3
Baja Karbon – Nikel	16,3	9,4
Kuarsa	41,6	24
Magnesit	4,15	2,4
Marmar	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
Batu Pasir	1,83	1,06
Kaca Jendela	0,78	0,45
Kayu Maple	0,17	0,096
Serbuk Gergaji	0,059	0,034
Air Raksa	8,21	4,74
Air	0,556	0,327
Amonia	0,540	0,312
Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042
Hidrogen	0,175	0,101
Helium	0,141	0,081
Udara	0,024	0,0139
Uap Air	0,0206	0,0119
Karbon Dioksida	0,0146	0,00844

Persamaan Hukum Fourier yang pertama berlaku dalam keadaan steady state, sementara untuk keadaan transient state berlaku persamaan:



$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = -kA \frac{\partial t}{\partial x} \dots \dots \dots \text{pers 2.9}$$

Persamaan yang baru ini digunakan pada aplikasi pemanasan sekaligus pendinginan material dalam satu sistem. Penggunaan persamaan akan lebih kompleks dan pada umumnya dikembangkan lagi menggunakan penyelesaian persamaan matematika atau menggunakan metode FDM. Untuk aliran panas dengan kondisi temperatur yang konstan dan tidak dipengaruhi waktu disebut dengan konduksi dalam keadaan *steady-state*. Untuk objek yang dipanaskan atau didinginkan, dengan perubahan terus-menerus di internal yang gradien temperatur disebut konduksi dalam keadaan *non-steady-state*.

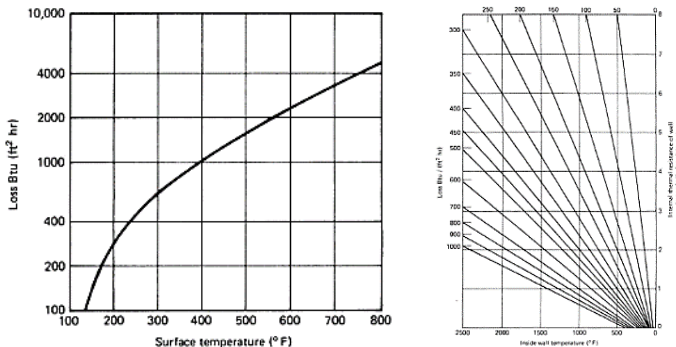
Persamaan Fourier dengan persamaan diferensial akan dihadapi dalam penyelesaian perpindahan panas secara konduksi atau bahkan secara umum, sehingga untuk menyederhanakannya digunakan pembatas atau biasa disebut boundary condition. Pembatas ini kemudian dibagi menjadi empat bagian yang perlu ditinjau:

- a. Kondisi Geometri, berhubungan dengan dimensi dan bentuk dari material yang diuji. Untuk memudahkan perhitungan biasanya, bentuk dan dimensi yang diteliti dibuat sesederhana mungkin.
- b. Kondisi Fisik, berhubungan dengan sifat fisik dari material, seperti berat jenis, kapasitas spesifik heat, konduktifitas termal, koefisien difusivitas, viskositas dan lain sebagainya. Kondisi kondisi tersebut harus diketahui yang biasanya bergantung pada temperatur atau tekanan
- c. Kondisi Initial, berhubungan dengan distribusi temperatur pada material mulai dari awal proses.
- d. Kondisi Permukaan, berhubungan dengan permukaan material yang diketahui. Kondisi ini dibedakan menjadi lima bagian. Pertama ketika temperatur pada permukaan material diketahui sebagai fungsi kordinat dan waktu. Yang kedua adalah ketika massa jenis heat flux diketahui pada permukaan material. Yang ketiga, ketika temperatur



material di lingkungan sama dengan temperatur kamar. Keempat ketika dua permukaan material saling kontak. Dan yang kelima adalah ketika terjadi transformasi fasa pada material tersebut.

Dalam aplikasi *furnace*, permasalahan yang sering ditemukan pada konduksi *steady state* adalah menghitung panas yang hilang dari dinding *furnace* yang terbuat dari beberapa lapisan material yang berbeda dan nilai konduktifitas termal yang berbeda pula. Metode yang sering digunakan adalah dengan menghitung total *thermal resistance* masing masing material dan menjumlahkan total lapisan material refraktorinya seperti **Gambar 2.8**. Karena konduktifitas dipengaruhi oleh temperatur, temperatur rata rata pada tiap lapisan dapat diperkirakan dari sebuah *preliminary* temperatur untuk dinding komposit. Secara keseluruhan thermal resistance akan berpengaruh pada radiasi, dan konduksi antara permukaan luar dinding dan sekelilingnya.

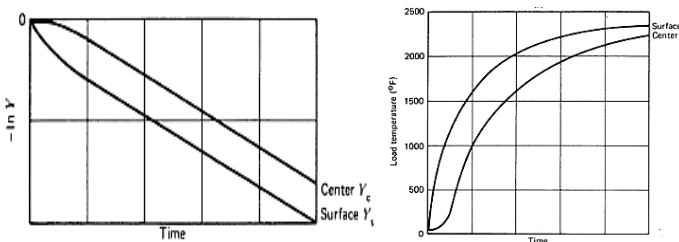


**Gambar 2.8** (a) Panas Yang Hilang Dari Dinding Sebagai Fungsi Temperatur (B) Panas Yang Hilang Dari Dinding Sebagai Fungsi *Thermal Resistance* Dinding Komposit (Caroll Cone, 2006)

Perpindahan panas pada *furnace* sewaktu pemanasan atau pendinginan adalah fenomena konduksi *non-steady-state* dengan profil temperatur dalam variasi waktu. Dengan besar thermal resistance yang kecil. Waktu pemanasan dapat dihitung untuk temperatur permukaan muatan yang diinginkan kemudian



menggunakan waktu-temperatur profil. Untuk kasus material slab yang dipanaskan pada jantung *furnace*, dengan kondisi hanya satu bagian permukaan yang terkena paparan panas secara langsung, perbedaan dari bagian yang dipanasi ke bagian yang tidak terpanasi akan menjadi nol. Bagian yang lebih cepat mendapatkan panas, akan menerima panas yang lebih banyak sampai permukaan sebaliknya terpanasi. Selanjutnya perbedaan temperatur akan semakin berkurang perlahan lahan, sampai perbedaan temperatur akhir yang diinginkan tercapai.



**Gambar 2.9** Maksimum Dan Minimum Temperatur Muatan Dan  $-\ln Y_s$  Atau  $-\ln Y_c$  Sebagai Fungsi Waktu Pemanasan Dengan Temperatur Sumber Panas Yang Konstan (Caroll Cone, 2006)

Pada **Gambar 2.9** diatas yang telah dibuat oleh Gurney-Lurie dkk, dapat diketahui nilai waktu pemanasan pada *furnace*, dimana (Caroll Cone, 2006):

Keterangan:

$T_f$  = Temperatur *Furnace*

$T_s$  = Temperatur permukaan muatan

$T_c$  = Temperatur inti atau bagian yang tidak terpanasi

$T_0$  = Temperatur awal muatan

$$Y_s = \frac{T_f - T_s}{T_f - T_0}$$

$$Y_c = \frac{T_f - T_c}{T_f - T_0}$$

R = Rasio ksternal/internal thermal resistance

X = Faktor waktu =  $tD/r^2$





D = Difusivitas

r = Kedalaman penetrasi panas (ft)

k = Konduktifitas termal muatan (Btu/ft.hr.°F)

H = Koefisien perpindahan panas eksternal (Btu/ft<sup>2</sup>.hr.°F)

### 2.6.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/ pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin seperti **Gambar 2.10**. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan oleh perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free / natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa / eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*). Pada aplikasi *furnace*, konveksi bebas terjadi pada permukaan luar *furnace* terhadap lapisan refraktori *furnace*. Sementara konveksi secara paksa terjadi antara gas dan permukaan muatan atau komponen padat *furnace* lainnya yang dihasilkan dari sumber energi panas dibantu dengan *recirculating fan*. Koefisien konveksi secara paksa akan bergantung pada bentuk geometri permukaan benda, sifat termal gas, dan bilangan Reynolds untuk aliran gas.

Persamaan dasar laju perpindahan panas secara konveksi menggunakan hukum *Newton's Law Cooling*:

$$q = -hA (T_w - T_{\infty}) \dots \dots \dots \text{pers 2.10}$$

Keterangan:

Q = Laju Perpindahan Panas (kj/det atau W)

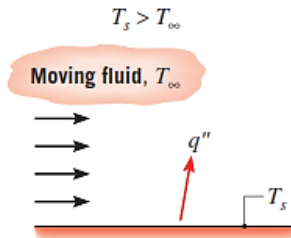
H = Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (W/m<sup>2</sup>.°C)

A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (ft<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)

T<sub>w</sub> = Temperatur Dinding (°C, K)



$T_{\infty}$  = Temperatur Lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ , K)



**Gambar 2.10** Perpindahan Panas Secara Konveksi (Sumber: Incropera, 2008)

Koefisien pindah panas permukaan atau “ $h$ ” bukanlah suatu sifat zat, tetapi menyatakan laju pindah panas di daerah dekat pada permukaan itu. Nilai – nilai tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

**Tabel 2.2** Nilai Koefisien Konveksi Material (Incropera, 2008)

Proses	$h$ ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
<i>Free Convection gas</i>	2-25
<i>Free Convection liquid</i>	50-1000
<i>Force Convection gas</i>	25-250
<i>Force Convection liquid</i>	100-20000
Konveksi dengan perubahan fasa	2500-100000

Ada tiga pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi nilai koefisien perpindahan panas secara konveksi:

1. Dengan analisis perpindahan panas secara konduksi melalui boundary layer
2. Dengan menganalogi antara proses perpindahan panas, massa, dan momentum, sebagai contoh perpindahan panas dapat diprediksi dari pengukuran gaya geser antara dinding dan aliran fluida.
3. Dengan pengukuran langsung menggunakan syarat tertentu dan menggunakan ekstrapolasi.



Untuk material dengan geometri yang sederhana, kemudian konveksi secara paksa dalam aliran yang laminar cara yang pertama dapat digunakan. Untuk geometri yang kompleks, kemudian dengan aliran yang turbulent, penyelesaian persamaannya akan susah diperoleh, bahkan dengan menggunakan software CFD.

### 2.6.3 Radiasi

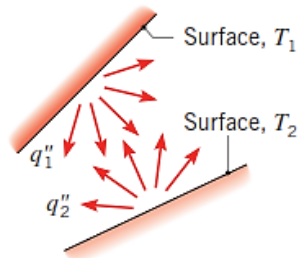
Perpindahan panas radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan jika terdapat ruang hampa di antara benda - benda tersebut. Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperatur, yang dipindahkan melalui ruang antara, dalam bentuk gelombang elektromagnetik seperti **Gambar 2.11**. Bila energi radiasi menimpa suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan , sebagian diserap dan sebagian diteruskan. Persamaan dasar laju perpindahan panas secara radiasi menggunakan Hukum Stefan Boltzman:

$$Q = \epsilon \sigma A T^4 \dots \dots \dots \text{pers 2.11}$$

Keterangan:

- Q = Laju Perpindahan Panas (W)
- $\sigma$  = Konstanta Boltzman ( $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ )
- A = Luas Permukaan Benda ( $\text{m}^2$ )
- T = Temperatur Absolut Benda ( $^{\circ}\text{C}$ , K)
- $\epsilon$  = Emissivity material

Pada **Tabel 2.3** terdapat nilai emisivitas material yang sangat menentukan laju perpindahan panas secara radiasi. Untuk menjaga perpindahan panas tidak terlalu besar, maka disarankan agar menggunakan material dengan nilai emisivitas yang rendah.



**Gambar 2.11** Perpindahan Panas Secara Radiasi (Incropera, 2008)

**Tabel 2.3** Nilai Emisivitas Material (Incropera, 2008)

Material	Emissivity
Polished Copper	0,035
Polished Stainless Steel	0,15
Cast, Oxidised Iron	0,63
Fire Clay Brick	0,90
Rough Steel Plate	0,94
Black, Oxidised Copper	0,80
Cream Paint	0,88
Wood	0,92
Water	0,96
Frost	0,98

## 2.7 Energi *Batch Furnace*

Energi *batch* digunakan untuk menentukan kebutuhan energi dari suatu proses, seperti pemanasan, pendinginan, dan kebutuhan daya, menunjukkan pola penggunaan energi pada tiap unit operasi dan unit proses, sehingga dapat dilakukan analisa apakah energi yang ada terlalu boros atau sudah optimal. Atau juga dapat digunakan untuk mengetahui efisiensi penggunaan energi dalam suatu pabrik/industri. Selain itu digunakan juga untuk menentukan insulator atau material lain yang akan digunakan pada



suatu unit proses / unit operasi, sehingga dalam hal ini diperlukan pemilihan jenis material yang tepat.

*Energy batch* merupakan salah satu indikator atau cara untuk menentukan *furnace* berjalan sesuai dengan sistem yang dibuat dengan rancangan yang efisien atau dengan kata lain energi yang diberikan seimbang dengan energi yang digunakan. Sama seperti sebelumnya untuk mengetahui nilai efisiensinya kita dapat menggunakan *indirect method*. Panas yang disimpan pun dapat dihitung berdasarkan perhitungan *energy batch*. Secara umum panas yang disimpan dalam *furnace* dapat dihitung dengan persamaan:

$$q_{storage} = q_{ht} - q_{ld} - q_{loss} - q_{air} + q_{fan} \dots \text{pers 2.12}$$

Keterangan:

$q_{storage}$  = Panas yang diserap oleh komponen struktur dan material insulator dari *furnace*

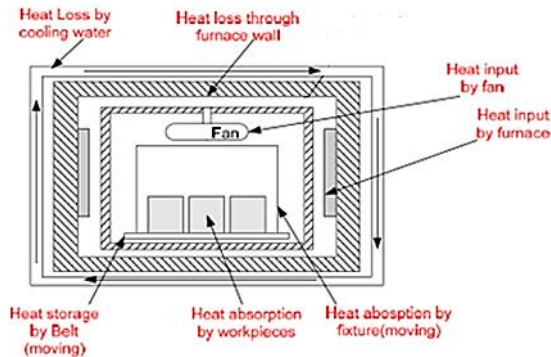
$q_{ht}$  = Panas yang diberikan oleh element pemanas

$q_{ld}$  = Panas yang hilang

$q_{air}$  = Panas yang diserap oleh atmosphere dalam *furnace*

$q_{fan}$  = Panas yang ditambahkan akibat konveksi oleh kipas

Seperti telah disebutkan sebelumnya berdasarkan pengoperasiannya, *furnace* dapat dibagi menjadi dua, yaitu *batch furnace* dan *continuous furnace*. Karena sistem yang berbeda makaterdapat perbedaan pula pada perhitungan energi *batch* pada kedua *furnace* tersebut. Pada umumnya *furnace* yang digunakan pada industri, adalah *continuous furnace*. Hal ini disebabkan karena *furnace* ini dapat menghasilkan jumlah produk yang lebih banyak, dan laju produksi yang lebih cepat dibandingkan dengan *batch furnace* yang cenderung digunakan untuk produksi kecil atau dalam skala lab. Namun dengan sistem yang *continuous* maka, biasanya *furnace* tersebut akan kehilangan banyak panas yang diberikan, karena paparan panas tersebut diserap oleh material – material penyusun *furnace* tersebut seperti **Gambar 2.12**.



**Gambar 2.12** Analisa Panas Pada *Continuous furnace*  
(Purushothaman, 2008)

Sehingga persamaan untuk *continuous* di tiap zona adalah

$$Q_{input} + Q_{fan_p} = Q_{Load_p} + Q_{fix_p} + Q_{belt_p} + Q_{wall\ loss_p} + Q_{open\ loss_p} + Q_{adjacent_p} + Q_{shell\ cooling_p} \dots\dots\dots pers\ 2.13$$

Keterangan:

- $Q_{input}$  = Panas yang masuk pada *furnace* oleh element pemanas
- p = Zona “p” dalam *furnace*
- $Q_{fan_p}$  = Panas masuk yang diberikan kipas
- $Q_{load_p}$  = Panas yang diserap muatan
- $Q_{fix_p}$  = Panas yang diserap oleh *fixture*
- $Q_{belt_p}$  = Panas yang diserap oleh belt
- $Q_{wall\ loss_p}$  = Panas yang hilang dari dinding *furnace*
- $Q_{open\ loss_p}$  = Panas yang hilang akibat pintu yang terbuka
- $Q_{adjacent_p}$  = Panas yang hilang antar zona dari ujung



*furnace* akibat perpindahan panas

$Q_{shell\ cooling\_p}$  = Panas yang diserap oleh pendingin *furnace*

1. Panas yang masuk

Panas yang masuk merupakan total panas yang diberikan agar besar panas pada muatan dapat mencaai sesuai dengan sifat yang akan dicapai. Namun karena suatu *furnace* terdiri dari beberapa komponen - komponen yang terkena dampak pemanasan tersebut, maka nilai panas yang masuk harus mempertimbangkan panas yang hilang dari komponen lainnya.

$$Q_{max\_in\_p} = K_{AH} q_{conn} \frac{L_p}{V} \dots \dots \dots \text{pers 2.14}$$

$K_{AH}$  merupakan koefisien panas yang mungkin diberikan, untuk sistem pemanas elektrik nilainya adalah satu.  $Q_{conn}$  merupakan panas yang dibutuhkan muatan. Sementara  $L_p$  dan  $V$  masing masing adalah panjang zona *furnace* dan kecepatan muatan bergerak.

2. Panas yang diserap muatan

Muatan merupakan material yang menjadi objek dalam pemanasan *furnace* tersebut. Oleh karena itu kebanyakan panas yang diberikan akan paling banyak dipakai untuk memanaskan muatan tersebut.

$$Q_{load\_p} = n_{domain} \sum_{i=1}^{n_{row}} \sum_{j=1}^{n_{col}} \sum_{k=1}^{n_{lay}} (wc)_{wp} (T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m) \dots \dots \dots \text{pers 2.15}$$

$n_{row}$ ,  $n_{col}$ ,  $n_{lay}$  merupakan jumlah baris, coloumn, dan layer dalam perhitungan domain, sementara  $i$ ,  $j$ , dan  $k$  merupakan jumlah muatan, sementara  $m$ , menunjukkan lama langkah waktu. Kemudian  $n_{domain}$  dihitung dengan membagi panjang zona *p* *furnace* dengan panjang domain

$$n_{domain} = \frac{L_p}{L_{domain}} \dots \dots \dots \text{pers 2.16}$$



### 3. Panas yang diserap *Fixture*

*Fixture* merupakan alat yang digunakan sebagai wadah muatan yang memegang atau menampung muatan secara langsung dan ikut bergerak dengan muatan melalui conveyornya. Temperatur *fixture* selalu atau dianggap sama dengan temperatur muatan yang paling cepat terpanasi.  $W$  adalah berat *fixture* dan  $c$  adalah nilai spesifik panas dari *fixture*.

$$Q_{fix\_p} = (wc)_{fix} (T_{fix}^{m+1} - T_{fix}^m) \dots \text{pers 2.17}$$

### 4. Panas yang diserap belt

Dalam hal ini temperatur belt diasumsikan sama dengan temperatur muatan yang paling cepat terpanasi. Dimana  $L_p$  merupakan panjang zona *p furnace* tersebut.

$$Q_{belt\_p} = \frac{L_{domain}(wc)_{belt}}{\sum_{i=1}^{nrow} \sum_{j=1}^{ncol} \sum_{k=1}^{nlay} (wc)_{wp}} Q_{load\_p} \dots \text{pers 2.18}$$

### 5. Panas yang hilang dari Dinding *Furnace*

Dinding yang terbuat dari material insulasi akan turut dalam menyerap panas, sehingga ada panas yang hilang. Dimana  $t_1$  dan  $t_2$  merupakan ketebalan dari bahan atau dinding dengan material 1 dan 2. Kemudian  $k_1$  dan  $k_2$  merupakan konduktifitas panas dari masing masing penyusun dinding *furnace* tadi. Lalu,  $\alpha$ , merupakan difusivitas termal dari bagian luar *furnace* ke kondisi kamar.

$$Q_{wall\ loss_p} = 2(L_p W_p + L_p H_p + H_p W_p) \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_o}} \frac{L_p}{v} \dots \text{pers 2.19}$$

### 6. Panas yang hilang akibat Dinding Terbuka

Panas yang hilang ini karena adanya perbedaan temperatur dalam *furnace* dengan udara terbuka akibat bagian *furnace* yang terbuka sehingga ada perpindahan panas secara radiasi. Dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzman,  $\varepsilon$  merupakan nilai emisivitas





dari dinding *furnace*,  $A_{open}$  merupakan luasan daerah yang terbuka dan  $T_a$  merupakan temperatur lingkungan.

$$Q_{open\ loss\_p} = \sigma \varepsilon A_{open} \frac{L_p}{v} ((T_{zone\_p}^m)^4 - (T_a)^4) \dots \dots \dots \text{pers 2.20}$$

7. Panas yang hilang akibat Pendingin *Furnace*

Untuk melindungi struktur terutama bagian refraktori *furnace* dari deformasi akibat panas maka dalam *furnace* perlu adanya pendingin agar menjaga kondisi struktur atau dinding *furnace* tetap terjaga dari deformasi akibat panas. Dimana  $v$  adalah laju aliran air pendingin,  $T_{out}$  dan  $T_{in}$  merupakan temperatur keluar dan masuk air.

$$Q_{shell\ cooling\_p} = \frac{\gamma \times V \times 60 \times \Delta T}{\Delta t \times 860} \dots \dots \dots \text{pers 2.21}$$

8. Perpindahan panas pada Zona yang berdekatan

Dengan adanya perbedaan temperatur antara zona dalam *furnace* maka akan terjadi transisi panas atau perpindahan panas antara zona yang berdekatan. Dimana  $A_{section}$  merupakan luas daerah perpotongan antar zona.

$$Q_{adjacent\_p} = \sigma \varepsilon A_{section} \frac{L_p}{v} ((T_p^m)^4 - (T_{p+1}^m)^4) + (T_p^m)^4 - (T_{p-1}^m)^4) \dots \dots \dots \text{pers 2.22}$$

9. Panas yang dilepaskan Kipas

Dengan adanya kipas pada *furnace* ini akan mempercepat laju perindahan panas atau dengan kata lain mempercepat pembakaran. Dimana  $HP_{fan}$  merupakan daya yang digunakan kipas.

$$Q_{fan\_p} = HP_{fan} \left( \frac{520}{460 + T_{fce\_p}} \right) \frac{L_p}{v} \dots \dots \dots \text{pers 2.23}$$

## 2.8 Komponen Utama *Continuous furnace*

Secara umum komponen utama *furnace* adalah sumber energi panas. Bagian ini dapat berupa gas, elektrik, atau hambatan



elektrik. Komponen selanjutnya adalah material insulator atau biasa disebut refraktori. Material ini berfungsi sebagai penahan atau penjaga panas dalam *furnace* supaya panas tersebut tidak terbuang buang, terkonsentrasi pada muatan yang dipanaskan, sehingga panas yang diberikan sumber panas dapat se efisien mungkin. Dua komponen ini menjadi komponen yang paling utama yang perlu menjadi bahan pertimbangan dalam merancang *batch furnace*. Namun jika berbicara mengenai *continuous furnace*, *furnace* tersebut mempunyai *sistem handling* yang digunakan agar prosesnya dapat berjalan secara otomatis dan kontinyu. Sehingga diperlukan komponen lainnya yaitu konveyor. Konveyor ini akan digunakan untuk menggerakkan muatan yang dipanasi dalam *furnace*, mulai dari masuk sampai keluar atau selesai diberi perlakuan. Dengan sistem ini kinerja *continuous furnace* akan lebih optimum dalam hal produksi, karena berjalan dengan *continuous* dan otomatis.

### 2.8.1 Elemen Pemanas

Elemen pemanas merupakan piranti yang mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui proses *Joule Heating*. Prinsip kerja elemen panas adalah arus listrik yang mengalir pada elemen menjumpai resistansinya, sehingga menghasilkan panas pada elemen. Persyaratan elemen pemanas antara lain :

1. Harus tahan lama pada suhu yang dikehendaki.
2. Sifat mekanisnya harus kuat pada temperatur yang dikehendaki.
3. Koefisien muai harus kecil, sehingga perubahan bentuknya pada temperatur yang dikehendaki tidak terlalu besar.
4. Tahanan jenisnya harus tinggi.
5. Koefisien temperatur harus kecil, sehingga arus kerjanya sedapat mungkin konstan.

Bahan yang paling banyak digunakan untuk pembuatan elemen pemanas listrik terdiri dari campuran : krom – nikel, krom – nikel – besi, krom – besi – alumunium. Bahan-bahan tersebut tahan terhadap temperatur tinggi karena membentuk lapisan oksida



yang kuat pada permukaannya, sehingga tidak terjadi oksidasi lebih lanjut. Bahan yang digunakan sebagian besar ditentukan oleh suhu maksimum yang dikehendaki. Logam-logam campuran tersebut diatas dapat digunakan sampai 1000°C hingga 1250°C. Untuk temperatur yang lebih tinggi, misalnya untuk tanur listrik dapat digunakan campuran kanthal. Campuran ini terutama terdiri dari krom, alumunium, besi dan kobalt, dan dapat dibedakan dari campuran krom nikel karena memiliki beberapa sifat penting berikut ini dan sifat mekanik seperti pada **Tabel 2.4**:

- Jika dipanaskan diudara, campuran kanthal akan membentuk kulit oksida yang sangat melekat.
- Elemen-elemen kanthal dapat digunakan sampai 1350°C.
- Tahanan jenis bahan ini  $(1,35 - 1,45) \times 10^{-6} \Omega m$ .

Umumnya bahan ini dapat diberi beban permukaan yang tinggi (dalam satuan W/cm ).

**Tabel 2.4** Data Sifat Element Pemanas (Kanthal Handbook, 1999)

Sifat Material	Nilai
Kekuatan Tarik (1550°C)	100 MPa
Kekuatan Bending (20°C)	450 MPa
Kekuatan Kompresif (20°C)	1400 – 1500 MPa
<i>Fracture Toughness</i> (20°C)	3 – 4 MPam <sup>1/2</sup>
Kekerasan HV (20°C)	9 GPa
Massa Jenis (1700°C)	5.6 g/cm <sup>3</sup>
Porositas	< 1%
Konduktifitas Termal (20 – 600°C)	30 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Konduktifitas Termal (600 – 1200°C)	15 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Koefisien Linear Expansion	7 -8 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
<i>Specific Heat Capacity</i> (20°C)	0.42 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Emissivitas	0.7 – 0.8
Resistivitas	Fungsi terhadap Temperatur



Kanthal super dapat digunakan sampai 1600°C. Bahan ini berupa bubuk yang dipanaskan hingga padat dan terdiri dari suatu bahan yang dapat disamakan dengan logam, dan suatu bahan keramik. Unsur-unsur utamanya ialah Mo, Si, dan SiO<sub>2</sub>. Beban permukaan untuk kanthal super dapat mencapai 10–20 W/cm. Tahanan jenisnya meningkat jika suhunya naik yaitu pada (Rais Rahmat M., 2015) :

- a. 20°C sama dengan  $0.4 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .
- b. 500 °C sama dengan  $1.2 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .
- c. 1000 °C sama dengan  $2.3 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .
- d. 1300 °C sama dengan  $2.9 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .
- e. 1600 °C sama dengan  $3.5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ .

Koefisien temperatur rata – rata nya sama dengan 0.0048

### 2.8.2 Refraktori

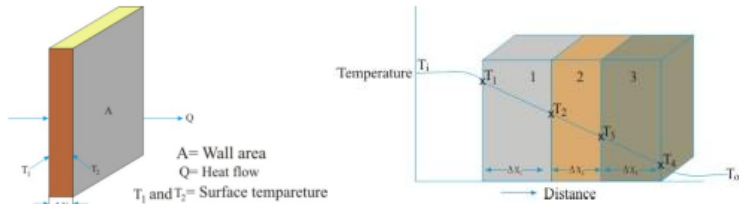
Pada *furnace* dengan temperatur tinggi dibutuhkan lapisan refraktori yang sesuai dengan sifat psiko-kimia-termal yang dibutuhkan, kemudian untuk menyimpan energi yang lebih efisien. Kebanyakan material refraktori dibuat dengan lapisan lebih dari satu dengan ketebalan yang berbeda beda. Dikarenakan material refraktori akan berhadapan dengan reaksi dalam *furnace*, maka material refraktori harus memiliki sifat seperti porositas yang rendah, tidak bereaksi dengan reaksi kimia, konduktifitas termal yang rendah, dan sifat refraktorinya tinggi. Ketebalan yang optimum merupakan salah satu hal yang sangat penting, selain dalam penghematan pengeluaran, juga mengontrol efisiensi energi dalam *furnace* tersebut (*Refractori Design in Furnace*).

Untuk area yang konstan dengan aliran panas dan konduktifitas termal yang konstan, maka aliran panas dapat ditulis dengan keadaan *steady state*

$$Q = -\frac{KA}{\Delta x} (T_2 - T_1)$$

Jika nilai K berubah terhadap temperatur maka persamaan menjadi

$$Q = -\frac{K_0 A}{\Delta x} [(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2)] \dots \dots \dots \text{pers 2.24}$$

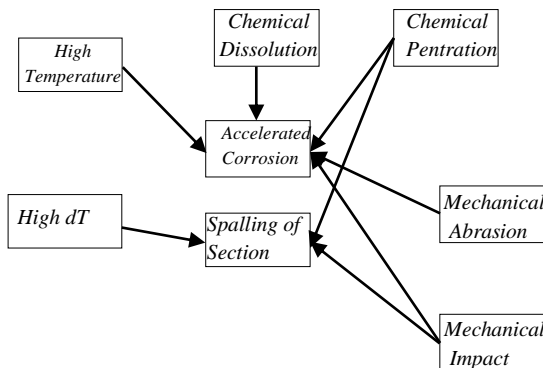


**Gambar 2.13** Perpindahan Panas Pada Refraktori atau Insulasi (Sumber: *Refraktori Design in Furnace*)

Jika material refraktori lebih dari satu lapisan seperti **Gambar 2.13** maka persamaan menjadi

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{A} \sum \frac{\Delta x_i}{K_i} + \frac{1}{h_4 A}} \dots \text{pers 2.25}$$

Dalam pemilihan material refraktori ada dua hal yang menjadi acuan agar material yang dipilih optimum. Yang pertama adalah desain terhadap sifat termal – mekanik – kemikal (TMC) dan yang kedua adalah total harga yang dikeluarkan oleh pemilik atau *total cost of ownership*



**Gambar 2.14** Sifat – Sifat Yang Dibutuhkan Pada Pemilihan Refraktori (Tom Vert, 2016)



Ketiga atau kombinasi dari sifat tersebut harus didesain dengan seimbang agar sifat yang dihasilkan optimum seperti **Gambar 2.14** (Tom Vert, 2016)

### 2.8.3 Konveyor

Konveyor digunakan untuk menggerakkan material pada saat pemanasan dalam *furnace* mulai dari awal sampai muatan selesai dipanasi secara kontinu. Konveyor yang baik adalah konveyor yang sesuai dengan lingkungan *furnace*, dan kapasitas nya sesuai dengan perancangan awal. Sehingga dalam merancang konveyor untuk *furnace* diperlukan langkah langkah seperti (*Conveyor Handbook*, 2009) :

1. Menentukan material konveyor, komposisi belt konveyor dibagi menjadi dua bagian yaitu:
  - a. Carcass, bagian konveyor yang harus cukup kuat untuk menahan tarikan dan menahan beban atau muatan dalam konveyor
  - b. Penutup, bagian konveyor yang membutuhkan sifat fisik dan ketahanan terhadap kimia untuk melindungi carcass sehingga menjadi salah satu bagian yang dapat memperpanjang umur konveyor.
2. Menentukan kapasitas belt, untuk memperoleh efisiensi yang besar, konveyor sebaiknya dioperasikan dengan muatan penuh pada konveyor. Kapasitas belt konveyor bergantung pada beberapa faktor seperti:
  - a. Lebar belt
  - b. Kecepatan belt
  - c. Massa jenis material
  - d. Kemiringan belt atau *furnace*
3. Menentukan *belt power dan tension*
  - a. *Belt Power* dihitung dengan persamaan:

$$P = \frac{F_c(L+t_f)(C+3.6QS)}{367} \pm \frac{CH}{367} \dots \text{pers 2.26}$$

Keterangan:

$F_c, F_e, F_l$  = *Friction Factor*

$L$  = Panjang belt (m)



tf	= Terminal Friction (t/h)
Q	= Massa muatan yang bergerak (kg/m)
S	= Kecepatan belt (m/s)
H	= Perubahan kemiringan (m)
K	= Drive Factor

b. Tegangan Efektif,  $T_e$ , dihitung dengan persamaan:

$$T_e = \left[ F_e(L + t_f)Q + F_l(L + t_f) \frac{C}{3.6S} + \frac{CH}{3.6S} \right] 9.81 \times 10^{-3} \dots \text{pers 2.27}$$

4. Diameter Pulley, diameter *pulley* minimum ditentukan dengan tiga faktor yaitu:

- Tebal *Carcass*, berhubungan dengan diameter *wire rope*, ketebalan *plie* dan *rubber skim*, dan ketebalan *woven fabric* atas dan bawah
- Tegangan Tarik Operasi, berhubungan dengan gaya tarik yang diijinkan
- Modulus *Carcass*, berhubungan dengan tegangan yang dihasilkan

Menentukan desain yang sesuai, terkait dengan jari jari lengkungan keatas dan mendatar.

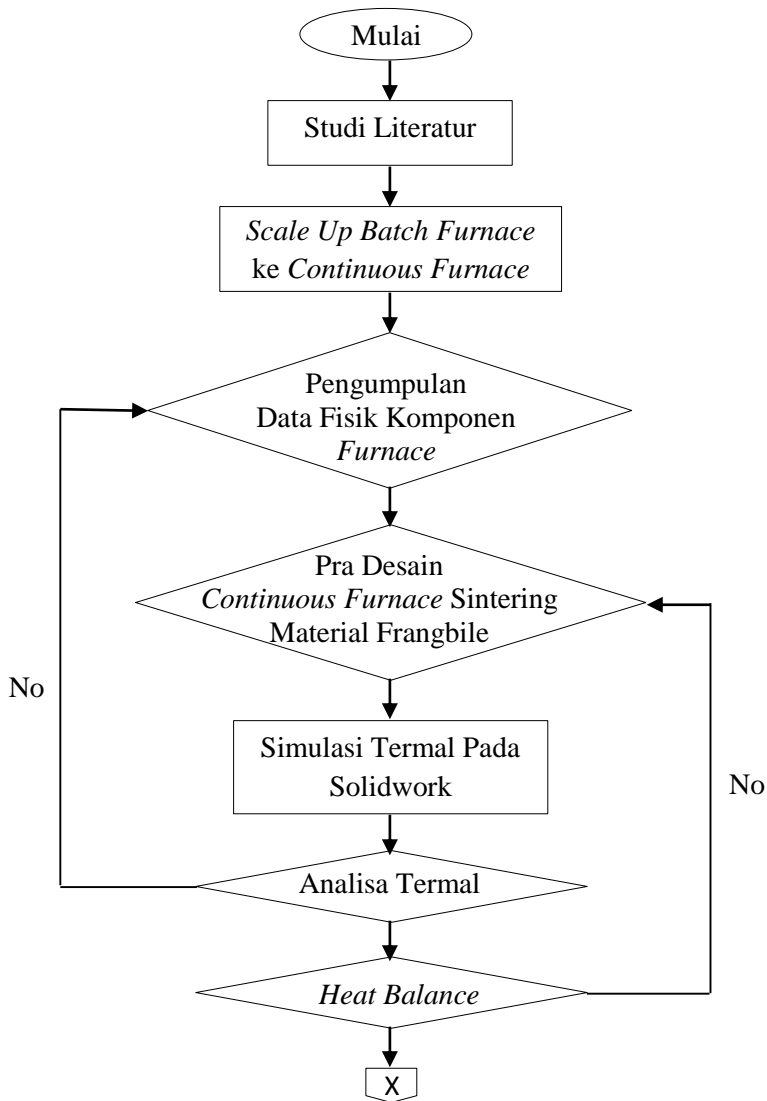
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

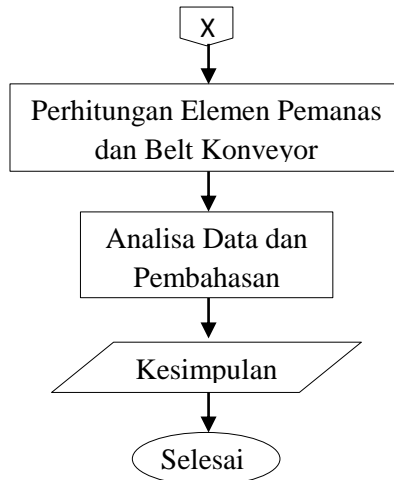




## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

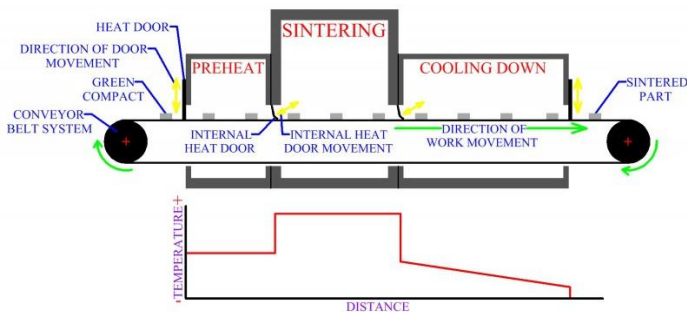




**Gambar 3.1** Diagram Alir Perancangan

### 3.2 Konseptual Desain

Konseptual desain merupakan desain secara umum yang akan digunakan pada *furnace* yang akan dirancang. *Continuous furnace* sintering terdiri dari tiga daerah atau zona pemanasan termasuk dengan pendinginan sekaligus dan zona pendukung seperti **Gambar 3.2** dan **Gambar 3.3**. Zona – zona tersebut adalah sebagai berikut:



**Gambar 3.2** Konseptual Desain *Continuous Furnace* Sintering



1. *Feed Zone*

Daerah ini merupakan daerah persiapan material ketika akan mulai dipanasi. Temperatur daerah ini berkisar sama dengan temperatur kamar.

2. *Pre Sinter Zone*

Daerah ini bertujuan untuk menghilangkan material yang mudah menguap seperti *lubricant* (zinc stearate pada material frangible) akibat pengaruh temperatur tinggi. Pemanasan diawal diberikan untuk menghilangkan unsur *lubricant* yang diberikan pada saat kompaksi, sehingga ketika masuk temperatur sintering, *lubricant* tadi sudah hilang. Jika pemanasan material dilakukan langsung pada temperatur sintering, *lubricant* tersebut tidak akan sempat menguap atau berdifusi keluar dari material itu, namun akan membentuk gelembung uap dalam material, hal ini dapat mengakibatkan porous pada material yang akan mengurangi sifat mekaniknya.

3. *Sinter Zone*

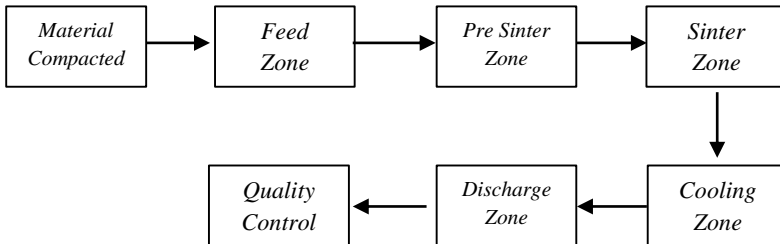
Daerah ini bertujuan untuk membentuk ikatan antar partikel serbuk, sehingga sifat mekanik yang diinginkan tercapai. Pada daerah sintering ini terjadi mekanisme pembentukan senyawa intermetallic yang kemudian menentukan sifat mekanik material tersebut.

4. *Cooling Zone*

Daerah ini bertujuan untuk mendinginkan temperatur material menjadi temperatur kamar. Pendinginan material frangible dilakukan dengan lambat, sehingga sifat dari material tersebut hampir sama dengan proses batch furnace.

5. *Discharge Zone*

Daerah ini merupakan daerah tunggu material setelah selesai pendinginan, dan akan dikumpulkan untuk ke proses selanjutnya. Temperatur daerah ini berkisar sama dengan temperatur kamar.



**Gambar 3.3** Proses *Flow Diagram Sintering*

### 3.3 *Scale Up Batch Furnace – Continuous furnace*

Proses ini dilakukan dengan mengubah *batch furnace* menjadi *continuous furnace* berdasarkan karakteristik kerja Batch Furnace. Dalam proses ini terdapat beberapa variable pada *continuous furnace* diambil dari kinerja atau proses *batch furnace*, nilai yang digunakan berdasarkan skala yang akan digunakan, dan beberapa nilai yang diasumsikan.

Nilai yang diambil pada mesin dan proses *batch furnace* material frangible sebagai acuan dalam mendesain *continuous furnace* adalah waktu. Nilai waktu dibagi menjadi 3 bagian untuk setiap zona dalam *continuous furnace*.

1. Waktu pemanasan sampai temperatur sintering adalah 30 menit
2. Waktu holding pada temperatur sintering adalah 30 menit
3. Waktu pendinginan setelah holding sampai material dikeluarkan adalah 180 menit

Kemudian nilai yang diambil sesuai dengan skala perancangan produksi material frangible dalam skala miniplant adalah :

1. Panjang *Continuous Furnace Sintering* : 3000 mm
2. Lebar *Continuous furnace Sintering* : 900 mm
3. Tinggi daerah pemanasan *Continuous Furnace Sintering*: 550 mm



Selanjutnya nilai yang diasumsikan pada perancangan *continuous furnace* sintering material frangible ini:

1. Panas spesifik (Specific Heat) material frangible : (material bronze)
2. Ketebalan refraktori : 200 mm
3. Temperatur sementara tiap zona furnace
  - a. *Pre Heat* : 225°C, 250°C, dan 275°C
  - b. *Sinter* : 300°C, 400°C, dan 500°C
  - c. *Cooling* : 25°C

### 3.4 Pengumpulan Data Sifat Fisik Komponen *Furnace*

Dalam *continuous furnace* terdapat beberapa komponen utama yang harus dimiliki. Komponen-komponen tersebut seperti element pemanas, material insulasi atau refraktori, dan conveyor. Sifat dari komponen – komponen akan berpengaruh terhadap performace dari *furnace* itu sendiri. Sehingga perlu dipertimbangkan sifat-sifat komponen tersebut agar *furnace* berjalan dengan efisiensi yang tinggi. Data sifat – sifat yang diperlukan berupa:

1. Emissivitas refraktori atau material insulasi
2. *Specific heat* dan konduktifitas termal refraktori atau material insulasi
3. Koefisien konveksi udara dalam furnace
4. *Specific heat* dan konduktifitas termal material conveyor
5. *Specific heat* dan konduktifitas termal material *fixture*
6. *Specific heat* dan konduktifitas termal material frangible

### 3.5 Pra Desain Continuous Sintering *Furnace* Material Frangible

Dari nilai-nilai yang telah diperoleh dari scale up, proses produksi, asumsi, dan data sifat fisik komponen-komponen furnace, maka desain *continuous furnace* sintering material frangible dapat dibuat dengan data sementara. Desain yang dibuat



terbatas pada desain struktur. Desain sementara ini kemudian akan dievaluasi apakah sudah efisien atau tidak.

### 3.5.1 Kecepatan Konveyor dan Panjang Zona

Kecepatan konveyor ( $V$ ) merupakan nilai yang tidak bisa divariasikan untuk masing masing zona furnace. Sehingga nilai yang dapat kita variasikan adalah panjang zona furnace. Kecepatan konveyor diperoleh dari perbandingan antara panjang *Continuous Furnace* dengan waktu pemanasan ketika menggunakan *Batch Furnace* dengan tersebut.

$$V = \frac{\text{Panjang Total Furnace}}{\text{Waktu Proses Sintering}} \text{ (mm/s)} \dots \text{pers 3.1}$$

Kemudian dengan total panjang *furnace* 3000 mm, maka untuk setiap zona dapat diketahui panjang zonanya ( $L_p$ ) berdasarkan perbandingan waktu pemanasan terhadap total panjang keseluruhan untuk mendapat kecepatan konveyor yang konstan.

$$L_p = \frac{\text{Waktu Proses Pada Zona Furnace}}{\text{Waktu Total Proses Sintering}} \times \text{Panjang Total Furnace} \dots \text{pers 3.2}$$

### 3.5.2 Rate of Production Material Frangible

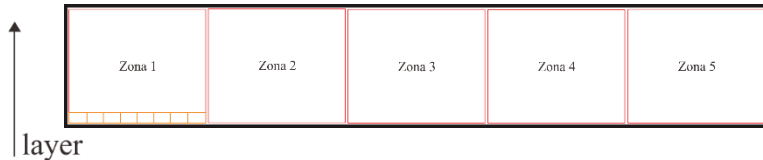
Untuk mengetahui laju produksi material frangible dalam *continuous furnace* selama sintering, maka diperlukan data dimensi ruang *furnace* untuk mengetahui jumlah material frangible dengan dimensi tertentu yang mampu ditampung. Berikut ini data dimensi ruang *continuous sintering furnace* material frangible:

- a. Panjang: 3000 mm
- b. Lebar : 900 mm
- c. Tinggi : 350 mm

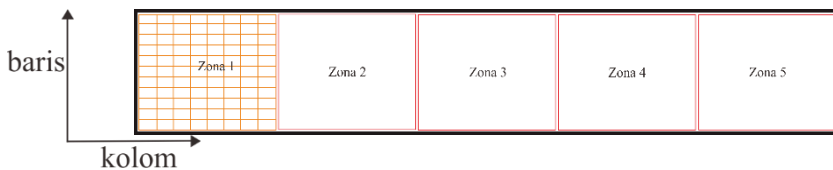


Susunan material tampak seperti **Gambar 3.4** dan **Gambar 3.5** dalam zona masing – masing seperti **Tabel 3.1**.

Material diasumsikan disusun secara teratur, dalam satu layer, dan posisi berdiri, maka dimensi ruang *furnace* dapat dibagi menjadi:



**Gambar 3.4** Susunan Muatan Tampak Samping



**Gambar 3.5** Susunan Muatan Tampak Atas

**Tabel 3.1** Zona Pada *Continuous Furnace* Sintering

No	Nama Zona	Fungsi
1	<i>Feed Zone</i>	Tempat tunggu material sebelum masuk zona pemanasan
2	<i>Pre Sinter Zone</i>	Menghilangkan material yang mudah menguap.
3	<i>Sinter Zone</i>	Membentuk ikatan antar partikel serbuk.
4	<i>Cooling Zone</i>	Mendinginkan material sampai pada temperatur kamar.
5	<i>Discharge Zone</i>	Tempat tunggu material sebelum proses selanjutnya.

Untuk memperoleh laju produksi dari *furnace* maka diperlukan data kecepatan, panjang total dan waktu tunggu material untuk bergerak sebesar ruang antar material (jarak domain) frangible.



$$\text{Laju produksi} = \frac{\text{jumlah material/baris}}{\text{waktu material bergerak sejauh jarak domain}} \dots \text{pers 3.3}$$

### 3.6 Simulasi dan Analisa Termal Pada Solidwork

Simulasi termal pada Solidwork dilakukan dengan memanaskan material frangible dengan variable temperatur yang telah ditentukan. Simulasi dilakukan pada zona pre sinter dan sinter secara terpisah. Simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan distribusi temperatur pada material frangible dan dinding furnace. Proses simulasi dilakukan dengan menggambar geometri material yang akan diuji. Kemudian memasukkan properties material sesuai dengan jenis material yang digunakan. Setelah itu memasukkan nilai temperatur, proses perpindahan panas (konveksi dan radiasi) berserta koefisien konveksi dan nilai emisivitas material, dan yang terakhir meshing dilanjut dengan *running simulasi*.

Setelah proses simulasi selesai diperoleh data berupa spectrum warna berdasarkan temperatur yang diterima pada material tersebut. Berdasarkan spectrum warna tersebut dapat ditentukan distribusi temperatur di dalam material tersebut. Material yang akan disimulasikan pada kali ini adalah material frangible dan material refraktori atau insulasinya. Simulasi pada material frangible bertujuan untuk mendapatkan temperatur *furnace* yang digunakan pada proses sintering agar tetap sesuai dengan temperatur yang diterima material pada saat di *batch furnace*. Setelah mendapatkan nilai temperatur yang tepat, temperatur tersebut dievaluasi terhadap susunan material refraktori.

### 3.7 Evaluasi Pra Desain Continuous Furnace Sintering Material Frangible

Desain sementara yang telah dibuat berdasarkan data sementara akan ditinjau dari segi *heat balance*.

$$Q_{input} = Q_{Load_p} + Q_{fix_p} + Q_{belt_p} + Q_{wall loss_p} + Q_{open loss} \dots \text{pers 3.4}$$





## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pra Desain *Continuous Furnace* Sintering

Pra desain *continuous furnace* sintering merupakan desain yang diperoleh dari hasil perbandingan terhadap proses pada *batch furnace* dan nilai kesepakatan sesuai dengan kapasitas mesin yang akan dibuat. Sehingga akan ada dua data yang menjadi bahan acuan yaitu data primer dan data dari proses *batch furnace*. Data yang dibuat sendiri, bergantung pada kapasitas *furnace* sebagai alat dalam miniplant adalah:

1. Panjang total *Continuous Furnace* Sintering: 3 m
2. Lebar *Continuous Furnace* Sintering : 0,9 m
3. Tinggi daerah pemanasan *Continuous Furnace* Sintering: 0.55 m

Sementara nilai yang menjadi acuan dalam perbandingan *batch furnace* ke *continuous furnace* sintering adalah waktu pemanasan pada saat proses *batch*. Waktu pemanasan dibagi menjadi 3 bagian waktu ditambah dengan satu bagian waktu ketika proses pemberian muatan pada *furnace*.

1. Waktu tunggu muatan sebelum masuk ke zona pemanasan: 5 menit
2. Waktu pemanasan sampai temperatur sintering: 30 menit
3. Waktu holding pada temperatur sintering: 30 menit
4. Waktu pendinginan setelah holding sampai material dikeluarkan: 180 menit
5. Waktu tunggu muatan sebelum masuk daerah packaging: 5 menit

#### 4.1.1 Panjang Zona dan Kecepatan Konveyor

Kecepatan konveyor diperoleh dari perbandingan antara waktu pemanasan dalam *batch furnace* dengan panjang *continuous furnace* tersebut. Dari data sintering material frangible menggunakan *batch furnace* diperoleh data waktu pemanasan seperti pada **Tabel 4.1**

**Tabel 4.1** Perbandingan Waktu Pemanasan Tiap Zona

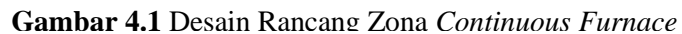
<b>Nama Zona</b>	<b>Lama Pemanasan (detik)</b>	<b>Perbandingan</b>
Feed	600	1
Pre Sinter	1800	3
Sinter	1800	3
Cooling	10800	18
Discharge	600	1
<b>Total</b>	<b>15600</b>	<b>26</b>

Kemudian dengan total panjang *furnace* 3000 mm, maka setiap zona dapat diketahui panjang nya berdasarkan perbandingan waktu pemanasan terhadap total panjang keseluruhan untuk mendapat kecepatan conveyor yang konstan seperti **Tabel 4.2**.

**Tabel 4.2** Panjang Tiap Zona dan Kecepatan Conveyor

<b>Nama Zona</b>	<b>Panjang Zona (mm)</b>	<b>Kecepatan (mm/s)</b>
Feed Zone	115,38	0,192
Pre Sinter	346,15	
Sinter	346,15	
Cooling	2076,92	
Discharge	115,38	
<b>Total</b>	<b>3000</b>	

Dengan pra desain yang telah dibuat, dapat memudahkan dalam pembuatan desain zona continuous furnace seperti pada **Gambar 4.1**.



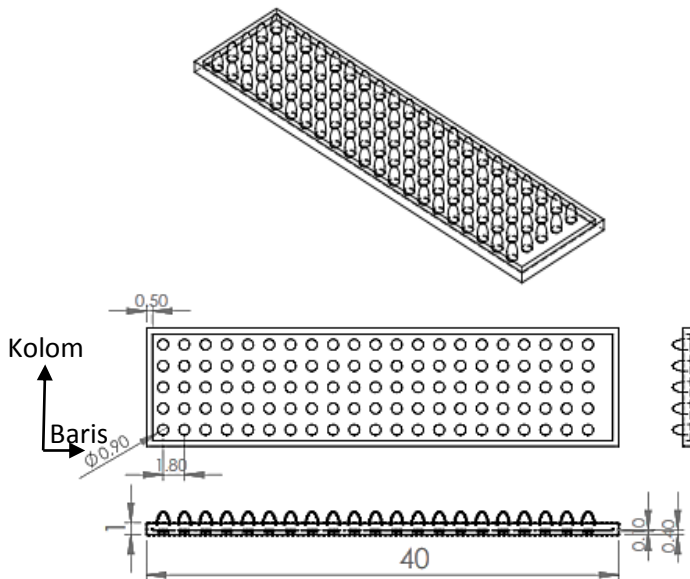


#### 4.1.2 Rate of Production Material Frangible

Untuk mengetahui laju produksi material frangible dalam *continuous furnace* selama sintering, maka diperlukan data dimensi ruang *furnace* untuk mengetahui jumlah material frangible dengan dimensi tertentu yang mampu ditampung. Berikut ini data dimensi ruang *continuous sintering furnace* material frangible:

- Panjang: 3000 mm
- Lebar : 500 mm
- Tinggi : 350 mm

Muatan atau material frangible diasumsikan disusun secara teratur, dalam satu layer, dan posisi berdiri, maka susunan material frangible dalam setiap *fixture* yang berukuran 40 x10 cm akan tampak seperti **Gambar 4.2**



**Gambar 4.2** Susunan Muatan Pada *Fixture*



Dari ukuran dan susunan material muatan dan *fixture*, maka diperoleh jumlah muatan yang bisa ditampung dalam masing masing zona pada *continuous furnace* sintering seperti **Tabel 4.3**

**Tabel 4.3** Jumlah Material Muatan Pada Masing – Masing Zona

Nama Zona	Jumlah Baris	Jumlah Kolom	Jumlah Layer	Jumlah Material
Feed Zone	5	21	1	105
Pre Sinter	15	21	1	315
Sinter	19	21	1	315
Cooling	94	21	1	1974
Discharge	5	21	1	105

Dengan kecepatan 0,192 mm/s dan satu peluru diestimasi memiliki jarak ruang 18 mm maka setiap satu baris material frangible akan masuk dalam waktu tiap 93 detik. Sehingga material frangible yang dapat dihasilkan adalah sebanyak 812 material frangible per jam.

## 4.2 Analisa Termal

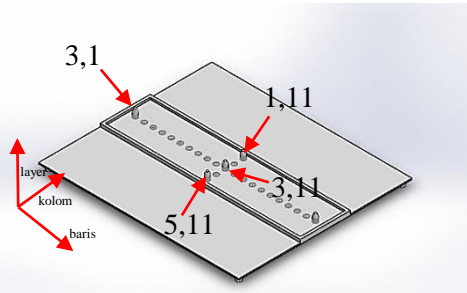
Analisa termal dilakukan untuk membantu analisa dari perancangan sementara yang telah dibuat berdasarkan temperatur. Analisa termal dilakukan menggunakan *Software Solidwork Thermal Simulation*. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui distribusi temperatur pada material yang terkena dampak pemanasan material sinteringnya. Dengan mengetahui distribusi temperatur kita dapat mengestimasi apakah temperatur yang digunakan sesuai dengan temperatur yang diharapkan untuk diterima material tersebut dengan asumsi bahwa nilai properties material tidak akan berubah terhadap temperatur.

### 4.2.1 Analisa Termal Material Frangible

Untuk menyederhanakan simulasi, maka pada simulasi kali ini hanya akan digunakan lima buah material frangible dengan empat posisi yang dianggap mewakili material frangible pada baris

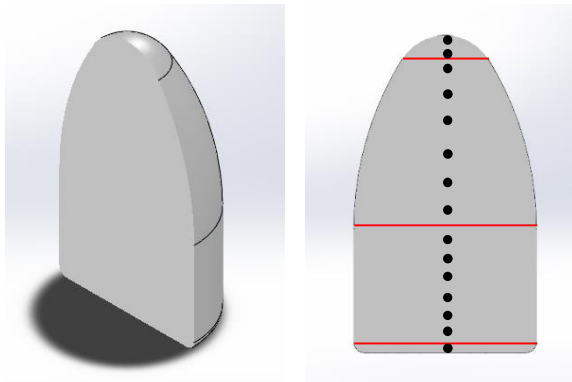


dan kolom lainnya. Posisi tersebut meliputi baris dan kolom (3,1); (3,11); (1,11); dan (5,11). Sehingga distribusi temperatur hanya akan dianalisa pada keempat posisi material ini seperti pada **Gambar 4.3**.



**Gambar 4.3** Posisi Material Frangible Pada Analisa Temperatur

Kemudian setelah menerima proses sintering pada simulasi, distribusi temperatur dari material frangible akan diperoleh dengan mengukur temperatur pusat material frangible mulai dari dasar sampai pucuk dengan masing – masing jarak pada daerah material frangible dengan titik probe atau sensor temperatur pada material frangible seperti **Gambar 4.4**



**Gambar 4.4** Posisi Sensor Temperatur Pada Material Frangible Untuk Analisa Temperatur

**Tabel 4.4** Input Nilai Pada Simulasi

No	Input Properties	Nilai
1	Konduktifitas Termal Material Frangible	50.208 W/mK
2	Koefisien Konveksi Udara	5 W/m <sup>2</sup> K
3	Emisivitas Material Frangible	0.8
4	Temperatur Pre Sinter	225, 250, 275°C
5	Temperatur Sinter	300, 400, 500°C
6	Total Waktu Masing Masing Zona	1800 detik
7	Time Step	93 detik

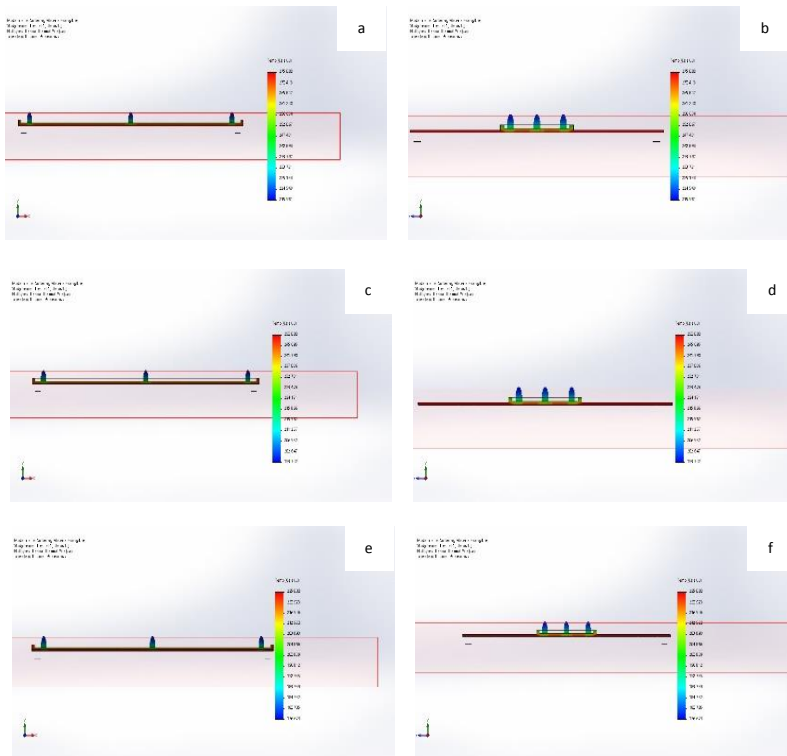
Selanjutnya analisa termal pada material frangible akan dilakukan pada Zona Pre Sinter dan Zona Sinter dengan input nilai seperti **Table 4.4**.

#### 4.2.1.1 Zona Pre Sinter

Zona Pre Sinter merupakan daerah pemanasan yang bertujuan untuk menghilangkan material atau senyawa yang mudah menguap sehingga pada saat masuk ke daerah yang memiliki temperatur yang lebih tinggi tidak terjadi pori pada material frangible yang akan mengurangi sifat mekanik material. Pada penelitian yang telah dilakukan, diperoleh bahwa temperatur optimum pre sinter adalah 200°C. Namun karena desain *furnace* yang baru daripada yang sebelumnya, maka temperatur operasi *furnace* akan kembali ditinjau kembali untuk mendapatkan temperatur material frangible optimum seperti pada proses sebelumnya. Pada simulasi ini digunakan tiga variabel temperatur pre sinter yaitu 225°C, 250°C, dan 275°C. Dari ketiga temperatur operasi ini akan dicari temperatur yang paling mendekati temperatur optimum material frangible berdasarkan hasil simulasi.

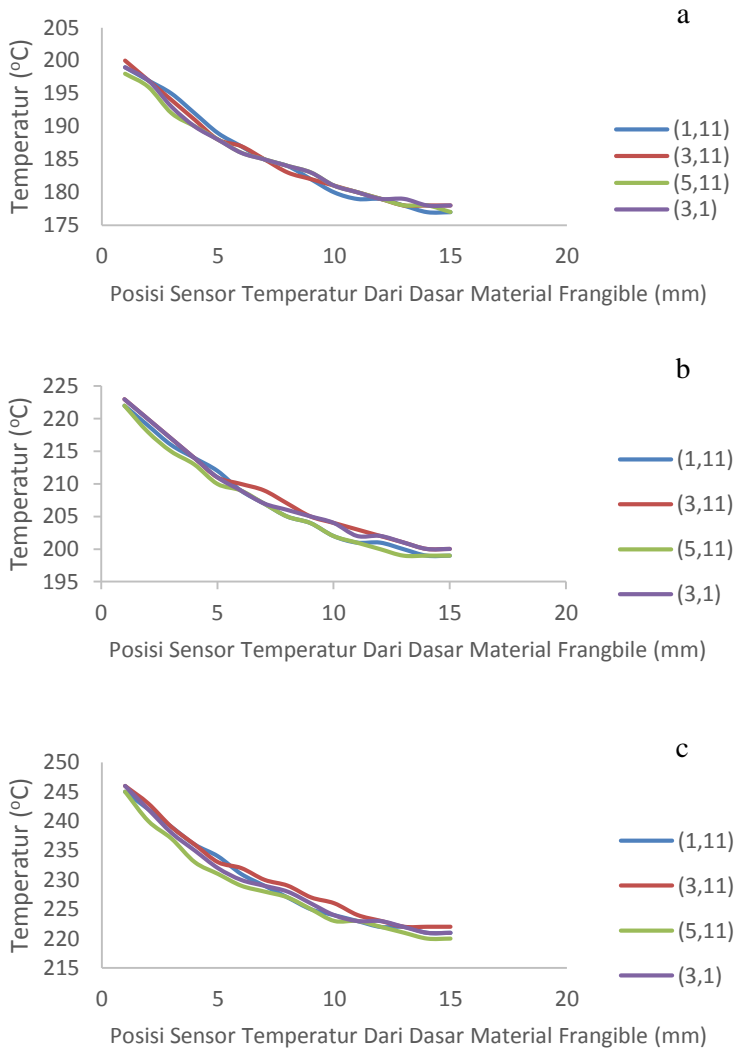
e

f



**Gambar 4.5** Gambar Penampang Material Frangible Pada Zona Pre Sinter (a,b)Temperatur 225°C (c,d)Temperatur 250°C (e,f)Temperatur 275°C





**Gambar 4.6** Distribusi Temperatur Pada Material Frangible (a) Temperatur 225°C (b) Temperatur 250°C (c) Temperatur 275°C



**Tabel 4.5** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 225°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan( (%)
1	(1,11)	185	0.13
2	(3,11)	185	0.13
3	(5,11)	184	0.4
4	(3,1)	185	0.13
<b>Rata - Rata</b>		<b>184.75</b>	<b>0.1975</b>

**Tabel 4.6** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 250°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan (%)
1	(1,11)	207	0.24
2	(3,11)	208	0.24
3	(5,11)	207	0.24
4	(3,1)	208	0.24
<b>Rata - Rata</b>		<b>207.5</b>	<b>0.24</b>

**Tabel 4.7** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 275°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan (%)
1	(1,11)	229	0
2	(3,11)	230	0.4
3	(5,11)	228	0.4
4	(3,1)	229	0
<b>Rata - Rata</b>		<b>229</b>	<b>0.2</b>

Berdasarkan **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6** temperatur paling tinggi pada material diperoleh pada daerah paling bawah material frangible, kemudian semakin ke atas atau puncak material frangible, hal ini dikarenakan panas yang ikut diberikan oleh belt conveyor secara konduksi akan mengakibatkan naiknya temperatur



pada bagian bawah material sedangkan pada bagian tengah sampai atas hanya terpapar radiasi dan konveksi dari element pemanas dan udara *furnace*. Sehingga temperatur cenderung menurun secara parabolik hingga ke puncak atau bagian atas material frangible.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Metrim (2015), temperatur optimum material frangible dalam proses pre sintering adalah pada temperatur 200°C dengan waktu tahan 30 menit. Jika diambil temperatur rata rata dari posisi dasar sampai puncak material frangible dan seluruh material frangible yang dipanaskan pada temperatur 225 °C, 250 °C, dan 275 °C secara berturut - turut, maka diperoleh temperatur rata rata sebesar 184.75°C, 207.5 °C, dan 229 °C. Maka nilai temperatur pemanasan yang paling mendekati temperatur optimum material (perbedaan 3.75%) adalah 250°C dengan temperatur material 207,5°C.

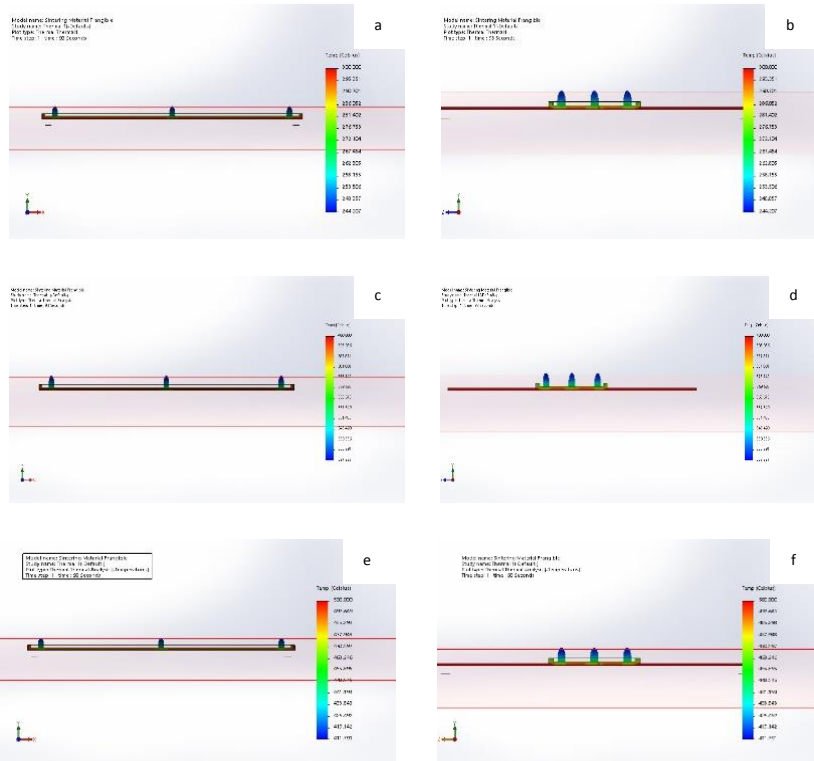
Dari **Tabel 4.5, Tabel 4.6, dan Tabel 4.7** tersebut juga diketahui bahwa distribusi temperatur cenderung merata di seluruh posisi susunan material frangible. Dari kelima posisi yang diambil, tidak terdapat perbedaan distribusi temperatur yang signifikan pada masing – masing posisi. Kerapatan distribusi temperatur pada susunan material frangible paling tinggi ke paling rendah berturut – turut adalah temperatur 225 °C, 275 °C, dan 250°C hal ini dilihat dari nilai simpangan deviasi yang berbanding terbalik dengan kerapatan distribusi. Namun secara umum dapat disimpulkan bahwa panas terdistribusi merata pada seluruh material frangible dalam *furnace* karena nilai simpangan yang kecil.

#### **4.2.1.2 Zona Sinter**

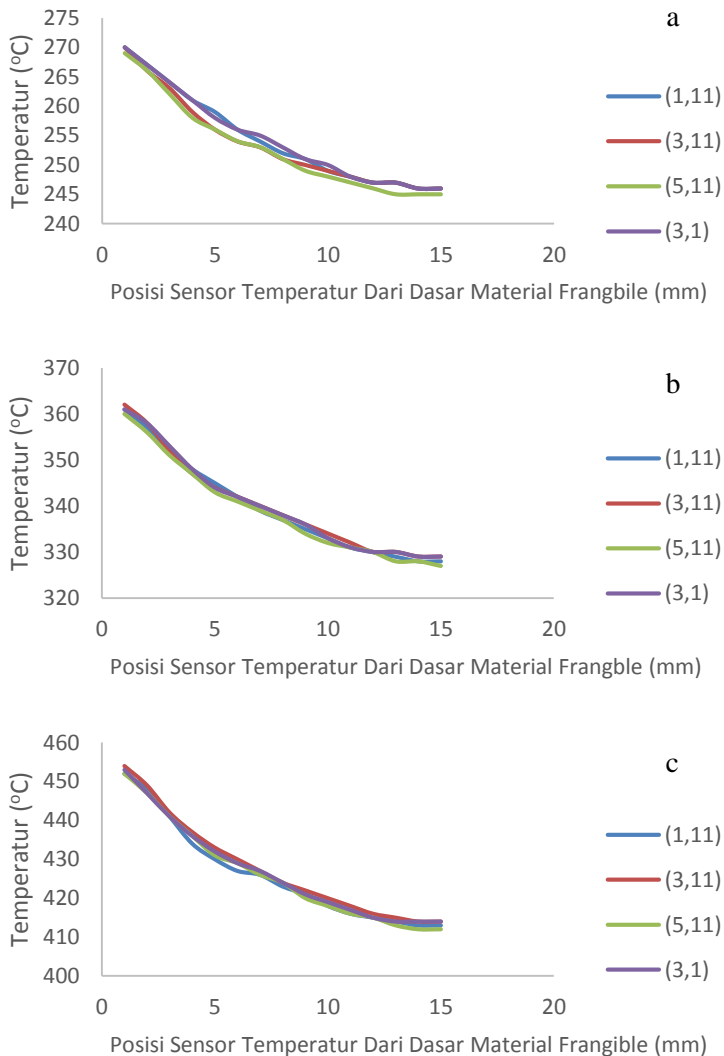
Zona Sinter merupakan daerah pemanasan yang bertujuan untuk memberntuk ikatan antar partikel – partikel serbuk yang telah dikompaksi. Dengan adanya pembentukan ikatan tersebut, sifat mekanik material frangible pun akan bertambah. Pada penelitian yang telah dilakukan, diperoleh bahwa temperatur optimum pre sinter adalah 250°C. Namun karena desain *furnace* yang baru daripada yang sebelumnya, maka temperatur operasi *furnace* akan kembali ditinjau kembali untuk mendapatkan



temperatur material frangible optimum seperti pada proses sebelumnya. Pada simulasi ini digunakan tiga variabel temperatur sinter yaitu 300°C, 400°C, dan 500°C. Dari ketiga temperatur operasi ini akan dicari temperatur yang paling mendekati temperatur optimum material frangible berdasarkan hasil simulasi.



**Gambar 4.7** Gambar Penampang Material Frangible Pada Zona Sinter (a,b)Temperatur 300°C (c,d)Temperatur 400°C (e,f)Temperatur 500°C



**Gambar 4.8** Distribusi Temperatur Pada Material Frangible (a) Temperatur 300°C (b) Temperatur 400°C (c) Temperatur 500°C



**Tabel 4.8** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 300°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan( %)
1	(1,11)	254	0
2	(3,11)	254	0
3	(5,11)	255	0.4
4	(3,1)	253	0.4
<b>Rata - Rata</b>		<b>254</b>	<b>0.2</b>

**Tabel 4.9** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 400°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan (%)
1	(1,11)	340	0.07
2	(3,11)	340	0.07
3	(5,11)	339	0.22
4	(3,1)	340	0.07
<b>Rata - Rata</b>		<b>339.75</b>	<b>0.1075</b>

**Tabel 4.10** Temperatur Rata - Rata Dalam Material Frangible Pada Temperatur 500°C

No	Posisi Material Frangible	Temperatur Rata – Rata (°C)	Simpangan (%)
1	(1,11)	426	0.11
2	(3,11)	427	0.11
3	(5,11)	426	0.11
4	(3,1)	427	0.11
<b>Rata - Rata</b>		<b>426.5</b>	<b>0.11</b>

Berdasarkan **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8** temperatur paling tinggi pada material diperoleh pada daerah paling bawah material frangible, kemudian semakin ke atas atau puncak material frangible, hal ini dikarenakan panas yang ikut diberikan oleh belt conveyer secara konduksi akan mengakibatkan naiknya temperatur



pada bagian bawah material, sedangkan pada bagian tengah sampai atas hanya terpapar radiasi dan konveksi dari element pemanas dan udara furnace. Sehingga temperatur cenderung menurun secara parabolik hingga ke puncak atau bagian atas material frangible.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Mia (2017), temperatur optimum material frangible dalam proses sintering adalah pada temperatur 260°C dengan waktu tahan 30 menit. Jika diambil temperatur rata rata dari posisi dasar sampai puncak material frangible dan seluruh material frangible yang dipanaskan pada temperatur 300 °C, 400 °C, dan 500 °C secara berturut - turut, maka diperoleh temperatur rata rata sebesar 254°C, 339.75 °C, dan 426.5°C. Maka nilai temperatur pemanasan yang paling mendekati temperatur optimum material (perbedaan 2.3%) adalah 300°C dengan temperatur material 254°C.

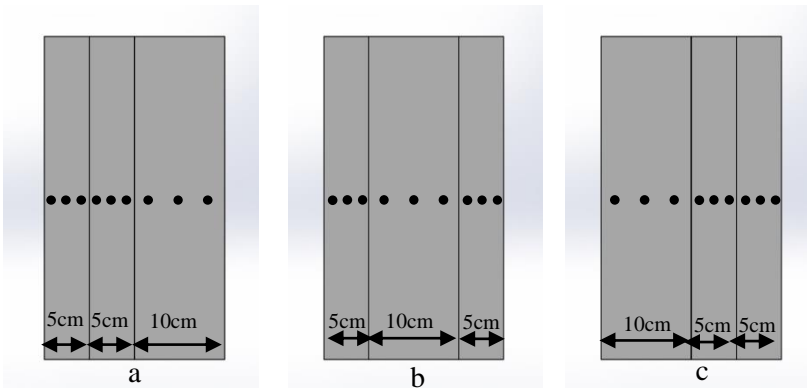
Dari **Tabel 4.8, Tabel 4.9, dan Tabel 4.10** tersebut juga diketahui bahwa distribusi temperatur cenderung merata di seluruh posisi susunan material frangible. Dari kelima posisi yang diambil, tidak terdapat perbedaan distribusi temperatur yang signifikan pada masing – masing posisi. Kerapatan distribusi temperatur pada susunan material frangible paling tinggi ke paling rendah berturut – turut adalah temperatur 400 °C, 500 °C, dan 300°C hal ini dilihat dari nilai simpangan deviasi yang berbanding terbalik dengan kerapatan distribusi. Namun secara umum dapat disimpulkan bahwa panas terdistribusi merata pada seluruh material frangible dalam *furnace* karena nilai simpangan yang kecil.

#### **4.2.2 Analisa Termal Pada Dinding Furnace**

Analisa termal terhadap dinding *furnace* dilakukan dengan variasi ketebalan masing – masing penyusun dinding furnace. Dinding *furnace* terdiri dari 3 lapisan material insulasi yang disusun secara berlapis. Ketiga material tersebut adalah Insulating Brick, Ceramic Fiber Blanket, dan Light Castables dengan total ketebalan 20 cm. *Insulating Brick* disusun pada bagian dalam pembakaran, kemudian dilapisi dengan *Ceramic Fibre Blanket*, dan pada bagian terluar digunakan *Light Castables*. Variasi



ketebalan yang digunakan adalah 5 cm dan 10 cm pada masing-masing lapisan sehingga total ketebalan sampai 20 cm. Sehingga terdapat tiga kemungkinan ketebalan yang bisa dibuat, salah satu misalnya 5.5.10 adalah 5cm *insulating brick*, 5cm *ceramic fibre blanket*, dan 10cm *light castables*. Kemudian untuk mendapatkan grafik distribusi temperatur maka pada setiap lapisan dinding furnace akan diberikan sensor untuk mengetahui nilai temperatur di masing – masing titik seperti pada **Gambar 4.9**.



**Gambar 4.9** Penampang Susunan Material Insulasi Pada Dinding Furnace dan Posisi Sensor Temperatur (a)5.5.10 (b)5.10.5 (c)10.5.5

**Tabel 4.11** Input Nilai Pada Simulasi

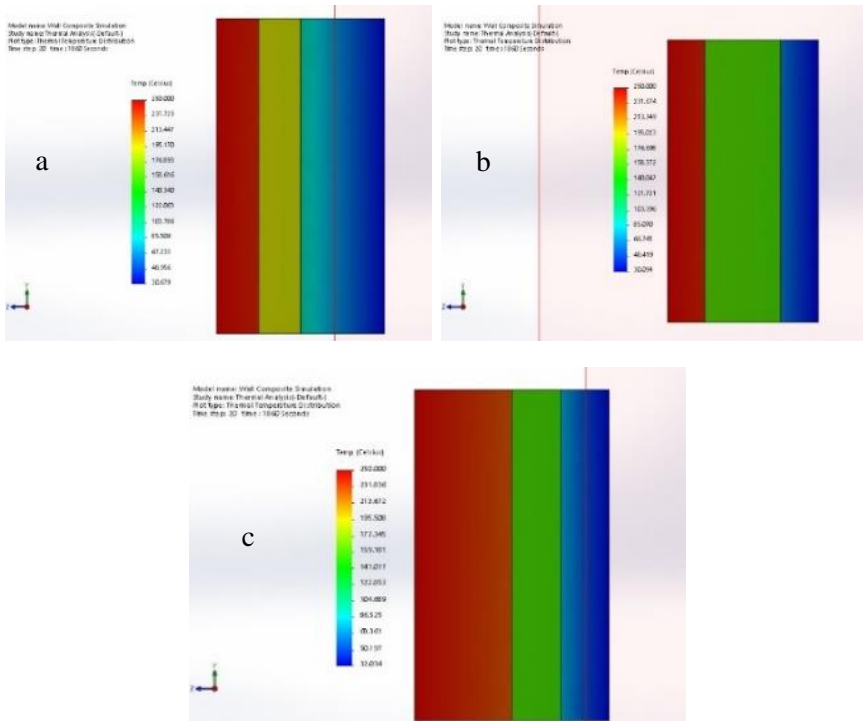
No	Properties Material	Nilai
1	Konduktifitas Termal <i>Insulating Brick</i>	0.91 W/mK
2	Konduktifitas Termal <i>Ceramic Fiber Blanket</i>	0.18 W/mK
3	Konduktifitas Termal <i>Light Castables</i>	0.27 W/mK
4	Koefisien Konveksi Pada Ruang Pembakaran	5 W/m <sup>2</sup> K
5	Koefisien Pada Ruang Kamar	25 W/m <sup>2</sup> K
6	Temperatur Pre Sinter	250°C
7	Temperatur Sinter	300°C



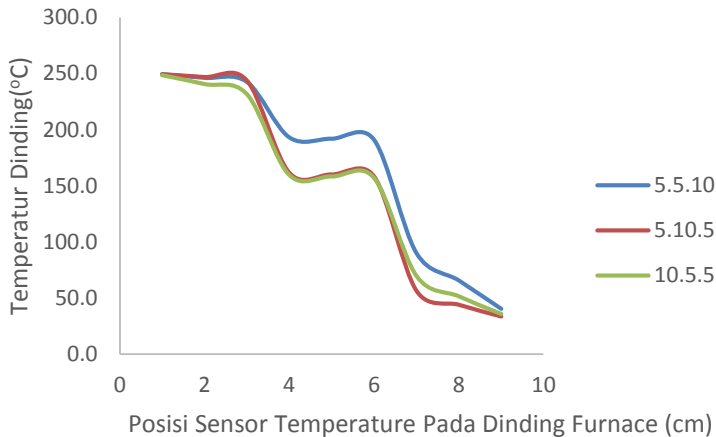


8	Total Waktu Masing Masing Zona	1800 detik
9	<i>Time Step</i>	93 detik

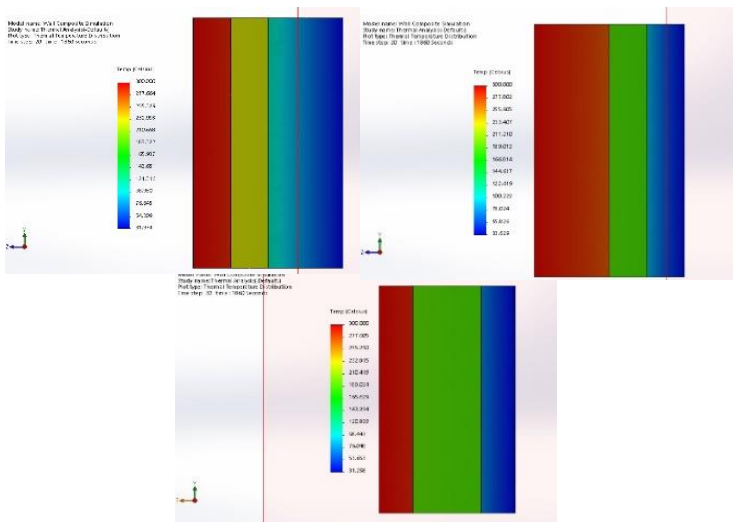
Dari nilai – nilai yang dimasukkan pada **Tabel 4.11** diperoleh data berupa distribusi temperatur untuk zona pre sinter dengan temperatur 250°C dan zona sinter dengan temperatur 300°C.



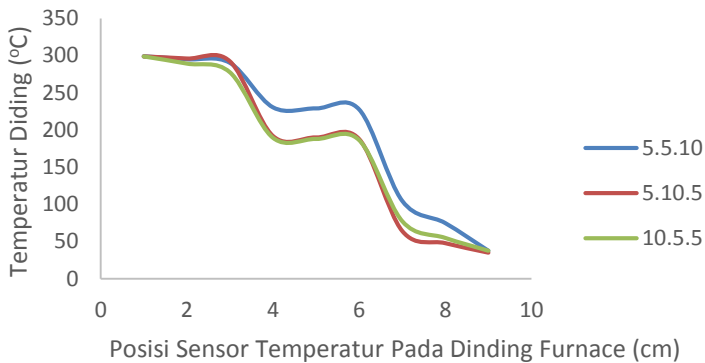
**Gambar 4.10** Simulasi Pada Dinding *Furnace* Zona Pre Sinter  
(a)5.510 cm (b)5.10.5 cm (c)10.5.5 cm



**Gambar 4.11** Distribusi Temperatur Pada Dinding Zona Pre Sinter



**Gambar 4.12** Simulasi Pada Dinding *Furnace* Zona Sinter  
(a)5.510 cm (b)5.10.5 cm (c)10.5.5 cm



**Gambar 4.13** Distribusi Temperatur Pada Dinding *Furnace* Zona Sinter

Dari hasil simulasi pada **Gambar 4.10**, **Gambar 4.11**, **Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13** diketahui bahwa susunan ketebalan material insulasi yang menghasilkan temperatur kamar paling rendah adalah 5.10.5 (*Insulating Brick* 5 cm, *Ceramic Fibre Blanket* 10 cm dan *Light Castables* 5 cm) untuk Zona Pre Sinter dan Zona Sinter. Dengan temperatur kamar yang paling rendah mengindikasikan bahwa panas yang keluar melalui dinding *furnace* dengan susunan tersebut paling sedikit. Hal ini dikarenakan material *ceramic fiber blanket* mempunyai nilai konduktifitas yang paling rendah dari dua material lainnya. Hal ini sesuai dengan Vikas (2016), material dengan nilai konduktifitas material yang serendah mungkin, semakin cocok digunakan sebagai material insulasi. Kemudian jika ditinjau dari rumus *thermal resistance*, ketebalan berbanding lurus dengan nilai *thermal resistance* dan berbanding terbalik dengan nilai konduktifitas. Sehingga dengan nilai ketebalan yang tinggi, dan nilai konduktifitas yang rendah, maka *material ceramic fibre blanket* mempunyai nilai *thermal resistance* yang paling tinggi. Dengan *thermal resistance* yang tinggi, maka panas yang ditransferkan semakin sedikit. Sehingga jika ditinjau dari fungsi



utama material insulasi sebagai penahan atau menyimpan panas pada ruang pembakaran, maka susunan 5.10.5 dinding *furnace* dianggap paling tepat.

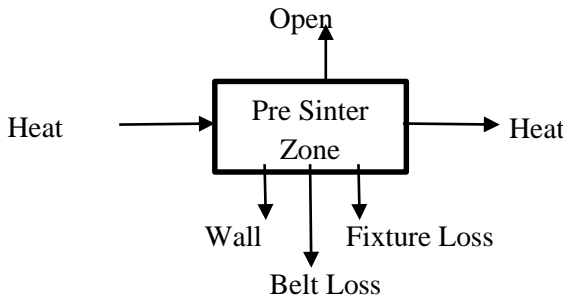
### 4.3 Heat Balance Pada Continuous Furnace Sintering

Perhitungan *heat balance* pada *continuous furnace* sintering dilakukan pada Zona Pre Sinter dan Sinter. Pada Zona *Cooling*, tidak dilakukan karena pada dasarnya panas yang diberikan adalah panas akibat sintering pada Zona Sinter, sehingga kontrol energi input akan sama dengan Zona Pre Sinter. Persamaan *heat balance* pada masing masing zona dirumuskan menjadi:

$$Q_{max\_input} = Q_{Load\_p} + Q_{belt\_p} + Q_{wall\ loss\_p} + Q_{open\ loss\_p} + Q_{shell\ cooling\_p}$$

#### 4.3.1 Heat Balance Pada Zona Pre-Sinter

Pada zona ini digunakan variable temperatur sebesar 200°C. Dengan neraca energi seperti **Gambar 4.14**, pada zona ini akan didapatkan *heat balance* seperti:



**Gambar 4.14** Neraca Energi Pada Zona Pre Sinter

#### 1. Heat Input

$$Q_{max\_in\_p} = K_{AH} q_{conn} \frac{L_p}{V}$$

**Tabel 4.12** Perhitungan Heat Input Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
----------	-------	--------



Jumlah muatan(n)	315	
Massa/muatan (m)	0.0063	kg
<i>Specific Heat</i> (Cp)	0.435	kJ/kgK
<i>T initial</i> (T)	25	K
<i>T final</i> (T)	250	K
Delta T (dT)	225	K
K <sub>AH</sub>	1	
Panjang Zone (Lp)	346.15	mm
Kecepatan (V)	0.192	mm/s
Lp/V	1802.864583	s
<i>Q_conn</i>	200.467575	Kj
<i>Q_max_in</i>	361415.8911	Kjs

## 2. Heat Load

$$Q_{load_p} = n_{domain} \sum_{i=1}^{n_{row}} \sum_{j=1}^{n_{col}} \sum_{k=1}^{n_{lay}} (wc)_{wp} (T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m)$$

**Tabel 4.13** Perhitungan Heat Load Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Waktu selang	1.55	menit
<i>T maks</i> (T)	250	°C
Waktu (t)	30	menit
Kenaikan Temperatur	8.33	C/menit
<i>Time Step</i>	2	menit
Jumlah Iterasi	15	x
<i>Weight Load</i> (w)	0.0063	kg
<i>Spesific Heat</i> (Cp)	0.435	kJ/kgK



Panjang Zona (Lp)	346.15	mm
L domain	18	mm
n domain	19.23056	
<i>Q load</i>	4808.73354	kJ

### 3. Heat Belt Conveyor

$$Q_{\text{belt\_p}} = \frac{L_{\text{domain}}(wc)_{\text{belt}}}{\sum_{i=1}^{n_{\text{row}}} \sum_{j=1}^{n_{\text{col}}} \sum_{k=1}^{n_{\text{lay}}} (wc)_{\text{wp}}} Q_{\text{load\_p}}$$

**Tabel 4.14** Perhitungan Heat Loss dari Belt Conveyor Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Panjang Zone (Lp)	346.15	mm
<i>Weight belt</i> (w)	0.000955	kg/mm
<i>Spesific heat belt</i> SS314 (Cp)	0.5	kJ/kgK
Panjang Domain (Ldomain)	18	mm
<i>Weight load</i> (w)	0.0063	kg
<i>Spesific heat load</i> (Cp)	0.435	kJ/kgK
<i>Q load</i>	6241.595	kJ
<i>Q belt</i>	923.6533	kJ

### 4. Heat Wall Loss

$$Q_{\text{wall loss}_p} = 2(L_p W_p + L_p H_p + H_p W_p) \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_o}} \frac{L_p}{v}$$

**Tabel 4.15** Perhitungan Wall Loss Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Panjang Zona (Lp)	0.34615	m
Tinggi Zona (Hp)	0.15	m
Lebar Zona (Wp)	0.5	m
Temperatur Akhir (Tp)	250	C



Temperatur Awal ( $T_a$ )	25	C
Kecepatan Konveyor ( $v$ )	0.000204	m/s
Waktu Operasi ( $L_p/v$ )	1696.81373	S
Tebal <i>Insulating Brick</i> ( $t_1$ )	0.1	m
Konduktivitas Termal ( $k_1$ )	0.91	W/mC
Tebal <i>Ceramic Fiber</i> ( $t_2$ )	0.05	m
Konduktivitas Termal ( $k_2$ )	0.18	W/mC
Tebal <i>Light Castables</i> ( $t_3$ )	0.05	m
Konduktivitas Termal ( $k_3$ )	0.27	W/mC
Koefisien Konveksi Pada Ruang Pembakaran ( $h_i$ )	10	W/m <sup>2</sup> C
Koefisien Konveksi Udara Kamar ( $h_o$ )	25	W/m <sup>2</sup> C
Luas Penampang ( $A$ )	0.06	m <sup>2</sup>
<i>Diffusivity</i> ( $\alpha$ )	0.000019	m <sup>2</sup> /s
<i>Q wall loss</i>	211.354	kJ

##### 5. Heat Open Loss

$$Q_{\text{open loss}_p} = \sigma \varepsilon A_{\text{open}} \frac{L_p}{v} ((T_{\text{zone}_p}^m)^4 - (T_a)^4)$$

**Tabel 4.16** Perhitungan Heat Open Loss Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Konstanta Boltzman	5.67E-08	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Emissivitas ( <i>Fire Brick Insulation</i> )	0.8	
Luas Area Penampang ( $A$ )	0.0064	m <sup>2</sup>
Panjang Zona ( $L_p$ )	346.15	mm
Kecepatan Konveyor ( $v$ )	0.192	mm/s
Waktu Operasi ( $L_p/v$ )	1802.86458	s
Temperatur Akhir ( $T_p$ )	473	K
Temperatur Awal ( $T_a$ )	298	K



$Q_{open\ loss}$	35.0307	kJ
------------------	---------	----

#### 6. Heat Fixture Loss

$$Q_{fix\_p} = (wc)_{fix} (T_{fix}^{m+1} - T_{fix}^m)$$

**Tabel 4.17** Perhitungan Heat Fixture Loss Zona Pre - Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Weight (w)	0.865375	Kg
Specific Heat SS314 (Cp)	0.5	kJ/kgK
Temperatur ( $T^{m+1}$ )	484	K
Temperatur ( $T^m$ )	298	K
Q fixture loss	80.47988	kJ

Berdasarkan perhitungan di atas diperoleh total energi panas yang hilang dalam Zona Pre Sinter adalah sebesar 361415.8911 kJ dengan energi input maksimal adalah sebesar 77816.818 kJ. Kemudian energi input minimal, berdasarkan energi yang hilang dapat dihitung dengan:

$$Heat\ Input\ Minimal = Heat\ loss \times (1+0.8)$$

$$Heat\ Input\ Minimal = 6059.2523535752 \times 1.8$$

$$Heat\ Input\ Minimal = 10906.65\ kJ$$

Sehingga *Heat Input* Operasi atau panas yang digunakan yang digunakan pada furnace dihitung dengan merata – ratakan nilai heat input maksimal dan heat input minimal

$$Heat\ Input\ Operasi = (361415.8911\ kJ + 10906.65\ kJ)/2$$

$$Heat\ Input\ Operasi = 186161.27055\ kJ$$

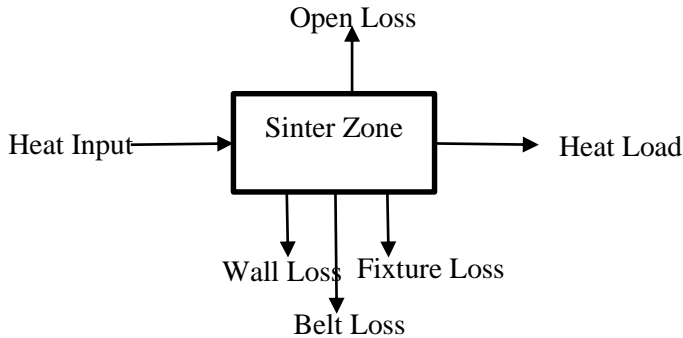
Dari data diatas juga diketahui bahwa energi yang hilang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan panas maksimal yang dapat diberikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa desain energi yang diberikan pada zona pre sinter ini sudah tepat.

### 4.3.2 Heat Balance Pada Zona Sinter





Pada zona ini digunakan variabel temperatur sebesar 300°C. Dengan neraca energi seperti **Gambar 4.15** pada zona ini akan didapatkan *heat balance* seperti:



**Gambar 4.15** Neraca Energi Zona Sinter

1. *Heat Input*

$$Q_{max\_in\_p} = K_{AH} q_{conn} \frac{L_p}{V}$$

**Tabel 4.18** Perhitungan Heat Input Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Jumlah muatan(n)	315	
Massa/muatan (m)	0.0063	Kg
<i>Specific Heat</i> (Cp)	0.435	kJ/kgK
<i>T initial</i> (Ta)	523	K
<i>T final</i> (Tb)	573	K
Delta T (dT)	50	K
K <sub>AH</sub>	1	
Panjang Zona (Lp)	346.15	Mm
Kecepatan Konveyor (v)	0.192	mm/s



Waktu Operasi (Lp/V)	1802.864583	S
$Q_{conn}$	43.162875	kJ
$Q_{max\_in}$	77816.818	kJ/s

## 2. Heat Load

$$Q_{load_p} = n_{domain} \sum_{i=1}^{n_{row}} \sum_{j=1}^{n_{col}} \sum_{k=1}^{n_{lay}} (wc)_{wp} (T_{i,j,k}^{m+1} - T_{i,j,k}^m)$$

**Tabel 4.19** Perhitungan Heat Load Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Waktu selang	1.55	menit
T maks (T)	300	C
Waktu	30	menit
Kenaikan Temperatur	0.833	C/menit
<i>Time Step</i>	1.55	menit
Jumlah Iterasi	15	X
<i>Weight Load(w)</i>	0.0063	Kg
<i>Spesific Heat(Cp)</i>	0.435	kJ/kgK
Panjang Zona (Lp)	346.15	Mm
L domain	18	Mm
n domain	19.23056	
$Q_{load}$	4559.71972	kJ

## 3. Heat Belt Conveyor

$$Q_{belt\_p} = \frac{L_{domain}(wc)_{belt}}{\sum_{i=1}^{n_{row}} \sum_{j=1}^{n_{col}} \sum_{k=1}^{n_{lay}} (wc)_{wp}} Q_{load\_p}$$

**Tabel 4.20** Perhitungan Heat Belt Conveyor Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
----------	-------	--------



Panjang Zone ( $L_p$ )	346.15	mm
Weight belt ( $w$ )	0.000955	kg/mm
Specific heat belt SS314 ( $C_p$ )	0.5	kJ/kgK
Panjang Domain ( $L_{domain}$ )	18	mm
Weight load ( $w$ )	0.0063	kg
Specific heat load ( $C_p$ )	0.435	kJ/kgK
$Q$ load	4559.71972	kJ
$Q$ belt	873.042	kJ

#### 4. Heat Wall Loss

$$Q_{wall\ loss_p} = 2(L_p W_p + L_p H_p + H_p W_p) \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_o}} \frac{L_p}{v}$$

**Tabel 4.21** Perhitungan Heat Wall Loss Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Panjang Zona ( $L_p$ )	0.34615	m
Tinggi Zona ( $H_p$ )	0.15	m
Lebar Zona ( $W_p$ )	0.5	m
Temperatur Akhir ( $T_p$ )	500	C
Temperatur Awal ( $T_a$ )	250	C
Kecepatan Konveyor ( $v$ )	0.000192	m/s
Waktu Operasi ( $L_p/v$ )	1802.865	S
Tebal <i>Insulating Brick</i> ( $t_1$ )	0.1	m
Konduktivitas Termal ( $k_1$ )	0.91	W/mC
Tebal <i>Ceramic Fiber</i> ( $t_2$ )	0.05	m
Konduktivitas Termal ( $k_2$ )	0.18	W/mC
Tebal <i>Light Castables</i> ( $t_3$ )	0.05	m
Konduktivitas Termal ( $k_3$ )	0.27	W/mC
Koefisien Konveksi Pada Ruang Pembakaran ( $h_1$ )	25	W/m <sup>2</sup> C



Koefisien Konveksi Udara Kamar (ho)	5	W/m <sup>2</sup> C
Luas Penampang (A)	0.06	m <sup>2</sup>
Diffusivity (α)	0.000019	m <sup>2</sup> /s
Q wall loss	49.82395	kJ

5. *Heat Open Loss*

$$Q_{\text{open loss}_p} = \sigma \varepsilon A_{\text{open}} \frac{L_p}{v} ((T_{\text{zone}_p}^m)^4 - (T_a)^4))$$

**Tabel 4.22** Perhitungan Heat Open Loss Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Konstanta Boltzman	5.67E-08	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Emissivitas ( <i>Fire Brick Insulation</i> )	0.8	
Luas Area Penampang (A)	0.0064	m <sup>2</sup>
Panjang Zona (Lp)	346.15	mm
Kecepatan Konveyor (v)	0.192	mm/s
Waktu Operasi (Lp/v)	1802.86458	s
Temperatur Akhir(Tp)	573	K
Temperatur Awal (Ta)	298	K
Q open loss	55.49498	kJ

6. *Heat Fixture Loss*

$$Q_{\text{fix}_p} = (wc)_{\text{fix}} (T_{\text{fix}}^{m+1} - T_{\text{fix}}^m)$$

**Tabel 4.23** Perhitungan Heat Fixture Loss Zona Sinter

Variabel	Nilai	Satuan
Weight (w)	0.865375	Kg
Specific Heat SS314 (Cp)	0.5	kJ/kgK
Temperatur (T <sup>m+1</sup> )	573	K
Temperatur (T <sup>m</sup> )	523	K
Q fixture loss	21.63438	kJ



Berdasarkan perhitungan di atas diperoleh total energi panas yang hilang dalam zona sinter adalah sebesar 5559.715752 kJ dengan energi input maksimal adalah sebesar 77816.818 kJ. Kemudian energi input minimal, berdasarkan energi yang hilang dapat dihitung dengan :

$$\text{Heat Input Minimal} = \text{Heat loss} \times (1+0.8)$$

$$\text{Heat Input Minimal} = 5559.715752 \times 1.8$$

$$\text{Heat Input Minimal} = 10007.49 \text{ kJ}$$

Sehingga *Heat Input* Operasi atau panas yang digunakan yang digunakan pada furnace dihitung dengan merata – ratakan nilai heat input maksimal dan heat input minimal

$$\text{Heat Input Operasi} = (77816.818 \text{ kJ} + 10007.49 \text{ kJ})/2$$

$$\text{Heat Input Operasi} = 43911.909 \text{ kJ}$$

Dari data diatas juga diketahui bahwa energi yang hilang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan panas maksimal yang dapat diberikan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa desain energi yang diberikan pada zona pre sinter ini sudah tepat.

#### **4.4 Perhitungan Design Komponen Continuus Furnace**

##### **4.4.1 Elemen Pemanas**

*Heat element* atau elemen pemanas merupakan sumber energi yang digunakan untuk proses sintering pada continuous furnace tersebut. Sumber panas yang berasal dari sistem elektrikal digunakan karena efisiensi yang tinggi, serta sistem kontrol yang lebih mudah, hal ini cukup penting jika ingin mendapatkan sifat yang sesuai dengan proses *batch furnace*. Jenis element pemanas yang digunakan adalah Kanthal Super 1700 dengan sifat:

1. Dapat digunakan pada atmosfer yang mengakibatkan oksidasi, sampai temperatur 1850°C
2. Umur pemakaian yang panjang, dan biaya *maintenance* yang sedikit.



3. Element yang lama dan yang baru dapat dihubungkan secara series
4. Power dengan nilai yang konsentrasi yang tinggi dapat diberikan
5. Dapat digunakan berulang ulang, atau berkala saja.

Maka untuk merancang sistem pemanas pada *continuous furnace* perlu dilakukan perhitungan sebagai berikut:

### Daftar Simbol

$G$  = Massa muatan per jam  
 $C$  = Specific Energi  
 $P_C$  = Furnace Power  
 $r_e$  = Heating Zone Resistance  
 $r_u$  = Terminal Resistance  
 $R_t$  = Hot Resistance  
 $L_H$  = Total Rod Length of Heating Zone  
 $L_T$  = Total Rod Length of Heating Terminal  
 $U$  = Connecting Voltage

### Furnace Power untuk zona Pre Sinter

$$\begin{aligned}
 P_C &= G \times C \\
 P_C &= (812 \text{ muatan/h} \times 0.0063 \text{ kg}) \times (51.711 \text{ kWh}/1.9845\text{kg}) \\
 P_C &= 5.1156 \text{ kg/h} \times 26.057 \text{ kWh/kg} \\
 P_C &= 133.297 \text{ kW} \\
 P &= \frac{P_C}{\eta} \\
 P &= \frac{133.297 \text{ kW}}{0.8} \\
 P &= 166.621 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

### Furnace Power untuk zona Sinter

$$\begin{aligned}
 P_C &= G \times C \\
 P_C &= (812 \text{ muatan/h} \times 0.0063 \text{ kg}) \times (12.197 \text{ kWh}/1.9845\text{kg}) \\
 P_C &= 5.1156 \text{ kg/h} \times 6.146 \text{ kWh/kg} \\
 P_C &= 31.4411 \text{ kW}
 \end{aligned}$$



$$P = \frac{P_C}{\eta}$$
$$P = \frac{31.4411 \text{ kW}}{0.8}$$
$$P = 39.301 \text{ kW}$$

**Heating Zone ( $L_e$ )** = 335 mm

**Intermediate heating zone (B)** =  $2 \times g = 50 \text{ mm}$

**Diameter  $L_e$  (d)** = 6 mm

**Terminal Zone ( $L_u$ )** = 225 mm

**Diameter  $L_u$  (D)** = 12 mm

**Jarak shank (a)** = 50 mm

**Surface Loading ( $P_{e \text{ tab}}$ )** = 0,166 w/mm<sup>2</sup>

**Jarak element ke dinding (e)**

$$L_e < 1000 \text{ mm} ; e = L_e/20$$
$$e = 335/20$$
$$e = 16,75 \text{ mm}$$

**Jarak ke lantai atau bawah (h)**

$$h \geq \frac{L_e}{20} : \text{min } 10 \text{ mm}$$

$$h = 335/20$$

$$h = 16,75 \text{ mm}$$

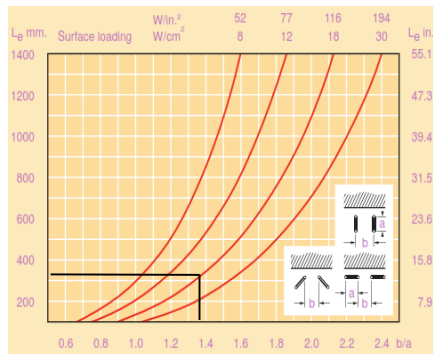
**Jarak antar element**

$$b/a = 1,39 \text{ (dari Gambar 4.14)}$$

$$b/50 \text{ mm} = 1,39$$



$$b = 69,5 \text{ mm}$$



**Gambar 4.16** Grafik Desain Perhitungan Jarak Antar Elemen Pemanas

### *Element Voltage Pre Sinter*

$$U = \sqrt{P \times R_t}$$

$$r_e = \frac{(0.0028 \times T_e - 0.255)}{d^2} \text{ untuk } T_e > 600^\circ\text{C}$$

$$r_e = \frac{(0.0028 \times 650 - 0.255)}{(6 \text{ mm})^2}$$

$$r_e = \mathbf{0,044}$$

$$r_u = \frac{(0.00196 \times T_f - 0.255)}{D^2}$$

$$r_u = \frac{(0.00196 \times 500 - 0.255)}{(12 \text{ mm})^2}$$

$$r_u = \mathbf{0,005}$$

$$L_H = \frac{2L_e + 20 + B(s - 2) + (S - 1)(0.57a - d)}{1000} \text{ m}$$

$$L_H = \frac{2.335 + 20 + 50(4 - 2) + (4 - 1)(0.57 \times 50 - 6)}{1000} \text{ m}$$

$$L_H = \mathbf{0,8575 \text{ m}}$$





$$L_T = \frac{2L_u}{\frac{1000}{2.225}} \text{ m}$$
$$L_T = \frac{1000}{2.225} \text{ m}$$
$$L_T = \mathbf{0,45 \text{ m}}$$

$$R_t = (r_e \times L_H) + (r_u \times L_T)$$
$$R_t = (0,044 \times 0,8575) + (0,005 \times 0,45)$$
$$\mathbf{R_t = 0,03998 \Omega}$$

$$U = \sqrt{P \times R_t}$$
$$U = \sqrt{P \times 0,03998 \Omega}$$
$$U = \sqrt{166621 \text{ W} \times 0,03998 \Omega}$$
$$\mathbf{U = 81.6180 \text{ V}}$$

#### *Element Current Pre Sinter Zone*

$$I = \frac{V}{R}$$
$$I = \frac{81.6180 \text{ V}}{0.03998 \Omega}$$
$$\mathbf{I = 2041.47 \text{ A}}$$

#### *Element Voltage Sinter*

$$U = \sqrt{P \times R_t}$$
$$r_e = \frac{(0.0028 \times T_e - 0.255)}{d^2} \text{ untuk } T_e > 600^\circ\text{C}$$
$$r_e = \frac{(0.0028 \times 650 - 0.255)}{(6 \text{ mm})^2}$$
$$\mathbf{r_e = 0,044}$$

$$r_u = \frac{(0.00196 \times T_f - 0.255)}{D^2}$$
$$r_u = \frac{(0.00196 \times 500 - 0.255)}{(12 \text{ mm})^2}$$



$$r_u = 0,005$$

$$L_H = \frac{2L_e + 20 + B(s - 2) + (S - 1)(0.57a - d)}{1000} \text{ m}$$

$$L_H = \frac{2.335 + 20 + 50(4 - 2) + (4 - 1)(0.57.50 - 6)}{1000} \text{ m}$$

$$L_H = 0,8575 \text{ m}$$

$$L_T = \frac{2L_u}{1000} \text{ m}$$

$$L_T = \frac{2.225}{1000} \text{ m}$$

$$L_T = 0,45 \text{ m}$$

$$R_t = (r_e \times L_H) + (r_u \times L_T)$$

$$R_t = (0,044 \times 0,8575) + (0,005 \times 0,45)$$

$$R_t = 0,03998 \Omega$$

$$U = \sqrt{P \times R_t}$$

$$U = \sqrt{P \times 0,03998 \Omega}$$

$$U = \sqrt{39301 \text{ W} \times 0,03998 \Omega}$$

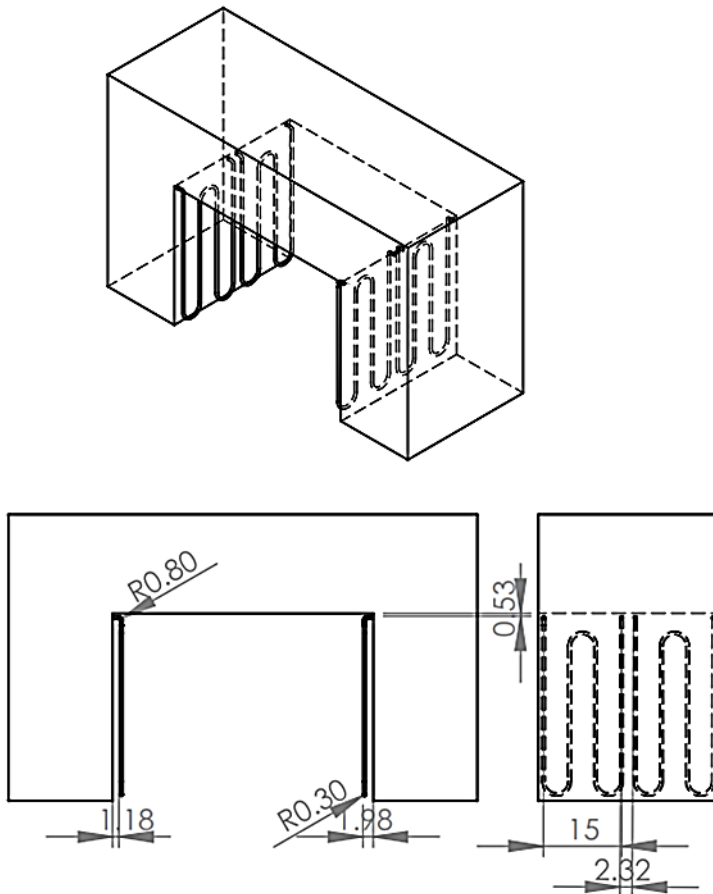
$$U = 39,6390 \text{ V}$$

### *Element Current Sinter*

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{39,6390 \text{ V}}{0,03998 \Omega}$$

$$I = 991,47 \text{ A}$$



**Gambar 4.17** Perancangan Elemen Pemanas *Continuous Furnace* Sintering

Dari perhitungan pada perancangan elemen pemanas, maka dapat diperoleh desain element pemanas pada continuous furnace dapat ditunjukkan pada **Gambar 4.17** kemudian daya yang dibutuhkan pada masing - masing zona furnace. Pada Zona Pre –



Sinter diperlukan daya sebesar 166.621 kW sedangkan pada Zona Sinter diperlukan daya sebesar 39.301 kW. Sehingga total daya yang dibutuhkan pada elemen pemanas adalah 205.922 kW. Kemudian total tegangan dan kuat arus yang dibutuhkan element pemanas adalah 121.257 V dan 3032.94 A. Dalam sistem pemanas furnace terdapat dua komponen utama yang harus dimiliki yaitu alat pengukur temperatur dan kontroller. Pada continuous furnace ini digunakan Termocouple type K sebagai alat atau sensor pengukur temperatur furnace, yang kemudian dirangkai dengan *microprocessor* kontroller atau biasa disebut *PID control*. PID (proportional, Integrative, Derivative), ini merupakan sistem kontroling yang biasa digunakan di dunia industri. Dengan daya yang sudah kita atur untuk proses pemanasan, sistem ini akan mengontrol daya tersebut agar sesuai dengan nilai yang sudah kita atur meskipun terjadi error. Sehingga nilai daya akan menyesuaikan ketika terjadi *error* pada lingkungan pemanasan.

#### 4.2.2 Belt Konveyor

Konveyor merupakan sistem penggerak muatan atau material yang dipanasi pada furnace. Salah satu perbedaan antara batch furnace dengan continuous furnace terletak pada sistem ini. Untuk menciptakan sistem input dan output yang berkerja secara kontinyu, maka diperlukan konveyor. Jenis conveyor yang digunakan adalah *mesh belt conveyor* yang biasa digunakan untuk aplikasi temperatur tinggi. Kemudian material jenis material mesh belt conveyornya adalah SS314. Menurut Anna, material paduan ini sangat direkomendasikan karena sangat efektif dari segi harga serta tahan terhadap aplikasi temperatur tinggi. Kemudian Anna menambahkan bahwa material SS314 sangat cocok digunakan pada aplikasi sintering material serbuk khususnya paduan – paduan tembaga, hal ini sangat sesuai dengan muatan yang akan di sintering yaitu material Cu-Sn.

Untuk merancang sistem material handling yang tepat, maka perlu dilakukan beberapa perhitungan terkait pada desain konveyor tersebut. Nilai nilai yang perlu dihitung adalah kecepatan



konveyor, luas area belt, kapasitas belt, massa material atau muatan pada belt, massa belt konveyor, beban volumetric belt, diameter roller, tegangan pada belt, dan daya motor.

### Daftar Simbol

A	= Luas Penampang Belt
P	= Panjang Belt
L	= Lebar Belt
$\rho$	= Massa Jenis Material Frangible
v	= Kecepatan Belt Conveyor
$T_e$	= Tegangan Efektif Belt
$U_R$	= Konstanta Friksi
m load	= Massa Muatan
m belt	= Massa Belt
m roller	= Massa Roller
Pm	= Power Motor
Pa	= Power Drive

### Kecepatan Belt Conveyor

Sesuai dengan waktu pemanasan dan pendinginan pada furnace, maka digunakan kecepatan yang sesuai yaitu: 0.192 mm/s

### Belt Section Area

$$\begin{aligned} A &= p \times l \\ &= 3 \text{ m} \times 0,04 \text{ m} \\ &= 0,12 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

### Belt Capacity

$$\begin{aligned} BC &= 3.6 \times A \times \rho \times V \\ &= 3,6 \times 0,12 \text{ m}^2 \times 7200 \text{ kg/m}^3 \times 0.000192 \text{ m/s} \\ &= 0,7931 \text{ kg/s} \\ &= 2.855 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

### Tegangan Efektif Belt

$$T_e = U_R \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times (m_{\text{load}} + m_{\text{belt}} + m_{\text{roller}})$$



$$T_e = 0.033 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times (30.369 \text{ kg} + 25.1178 \text{ kg} + 30 \text{ kg})$$

$$T_e = 27.6747 \text{ N}$$

### Tegangan Maksimum Belt

$$T_{\max} = \frac{T_e \times 25}{W}$$

$$T_{\max} = \frac{27.6747 \times 25}{400 \text{ mm}}$$

$$T_{\max} = 41.512 \text{ N}$$

### Roller Diameter

Nilai diameter roller diperoleh dari tabel Handbook Conveyor berdasarkan nilai lebar belt dan kecepatan conveyor. Dari tabel tersebut diperoleh diameter roller sebesar 89 mm.

### Power Pada Drive Drum (Pa)

$$P_a = \frac{T_e \times V}{1000}$$

$$P_a = \frac{27.6747 \times 0.192 \text{ mm/s}}{1000}$$

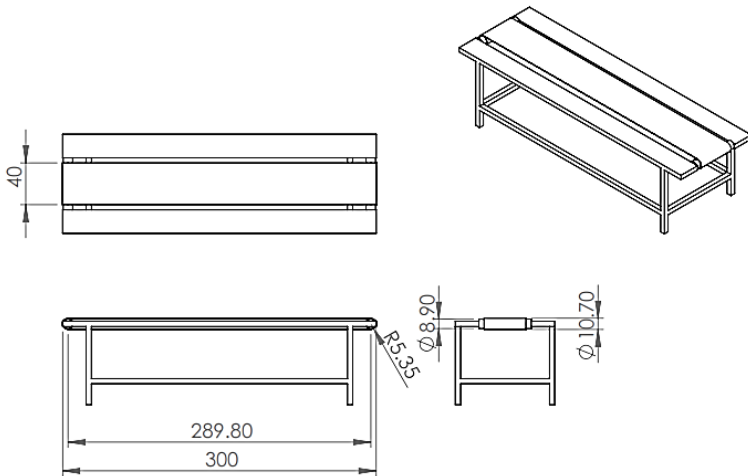
$$P_a = 0.00531 \text{ kW}$$

### Motor Powers (Pm)

$$P_m = \frac{P_a}{0.8}$$

$$P_m = \frac{0.00531 \text{ kW}}{0.8}$$

$$P_m = 0.00664 \text{ kW}$$



**Gambar 4.18** Desain Belt Konveyor

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan maka desain Belt Konveyor untuk *Continuous Furnace* Sintering ditunjukkan pada **Gambar 4.18**, kemudian daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan belt adalah sebesar 0.00664 kW atau 6.64 W. Untuk mengatur kecepatan pada motor konveyor maka digunakan AC *Speed Control Motors* dirangkai dengan inverter yang memiliki rentang daya output sebesar 6 W sampai 200 W. Kemudian sistem penggerak ini dirangkai dengan PID control untuk menjaga laju konveyor tetap pada nilai yang telah dimasukkan.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*





## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari studi perancangan *Continuous Furnace* Sintering Material Frangible Cu-5%Sn ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Temperatur operasi optimum pada *Continuous Furnace* pada proses sintering Material Frangible Cu-5%Sn pada zona pre sinter adalah 250°C sedangkan pada zona sinter adalah 300°C.
2. Spesifikasi Desain *Continuous Furnace* Sintering

No	Komponen Furnace	Nilai
1	Dimensi (PxLXT)	(3x0.9x0.55) m
	Panjang <i>Feed Zone</i>	115.38 mm
	Panjang <i>Pre Sinter Zone</i>	346.15 mm
	Panjang <i>Sinter Zone</i>	346.15 mm
	Panjang <i>Cooling Zone</i>	2076.92 mm
	Panjang <i>Discharge Zone</i>	115.38 mm
2	Elemen Pemanas	
	Jenis	Kanthal Super 1700 MoSi <sub>2</sub> , 4 Shank Heat Element
	Jumlah	8 set
	Total Power	205.922 kW
	Total Voltage	121.257 V
	Total Current	3032.94 A
3	Belt Konveyor	
	Jenis Belt	<i>Mesh Belt</i>
	Jenis Material	SS314
	Panjang	6279.46 mm
	Lebar	400 mm
	Kecepatan	0.192 mm/s
	<i>Total Power</i>	0.01195 kW



4	<i>Atmosphere Furnace</i>	Udara
5	Mekanisme Pendinginan	<i>Annealing</i>
6	Material Insulasi Jenis  Tebal Komponen        Susunan	<i>Composite Wall</i> <i>Insulating Brick</i> 50 mm <i>Ceramic Fibre Blanket</i> 100 mm <i>Light Castables</i> 50 mm <i>Insulating Brick-CFB-Light Castables</i>
7	Laju Produksi Material Frangible	812 material/jam
8	<i>Total Power Furnace</i>	205.93395 kW

## 5.2 Saran

1. Untuk mengkonfirmasi rancangan *Continuous Furnace* yang telah dibuat, perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut mengenai sifat thermal material frangible.
2. Menggunakan simulasi atau pemodelan menggunakan analisa numerik dengan software khusus FEM seperti ANSYS.
3. Melakukan analisa ekonomi terhadap proses perancangan *Continuous Furnace* Sintering ini.



## DAFTAR PUSTAKA

- \_\_\_\_\_. 2009. **Conveyor Handbook**. Australia: Fenner Dunlop Conveyor Belting Australia.
- Bases, Gary. 2002. **Saving Energy With Brick, Refractory, Insulation, And Lagging**. Copley: BRIL Inc.
- Baukal, Charles. 2000. **Heat Transfer in Industrial Combustion**. Florida: CRC Press LLC
- Bruchon, D., Daniel, P., dan Sylvain, D. 2012. **Solid-State Sintering Simulation: Surface, Volume, and Grain-Boundary Diffuions**. ECCOMAS 2012.
- Daniyan, I.A. 2014. **Design of a Material Handling Equipment: Belt Conveyor for Crushed Limestone Using 3 Roll Idlers**. Nigeria: Afe babola University
- Ekiti, Ado. 2014. **Design of Material Handling Equipment: Belt Conveyor System For Chrused Limestone Using 3 Roll Idlers**. Nigieria: Mechanical and Mechatronics Engineering.
- German. 1984. **Powder Metallurgy Science**. (USA: Metal Powder Industries Federation)
- German, R., Suri Pavan, Seong Jin Park. 2008. **Review: Liquid Phase Sintering**. LLC: New York
- Holman, JP. 2010. **Heat Tranfer Tenth Edition**. New York: McGraw – Hill
- Jogai, R.K., R.N. Nandy. 2012. **Selection Of Proper Refractory Materials For Energy saving in Aluminium Melting And Holding Furances**. India: IJME.



- Kang, Jinwu, Radha Purushothaman, Weiwei Wang, dkk. 2003. **CHT-CF- Development of An Analytical Tool For Part Load Design And Temperatur Control in Continuous Furances.** USA.
- Korecki, Maciej. 2007. **Temperatur Control System For Controlling Heat Treatment Of Metal, That Is Heating, Soaking, And Cooling By A Single Frequency Converter.** USA: United State Patent.
- Moore, Robert. 1992. **Standard And Non-Standard Physical Property Test Methods For Refractories.** Rolla: University of Missouri.
- Morooka. 1974. **Method of And System For Controlling Temperaature of Continuous Furnace.** Japan: Hitachi, Ltd.
- Mukhraiya, Vikas. 2016. **Thermal Conductivity Analysis In Various Materials Using Composite Wall Apparatus.** India: IJMET
- Nitin, Bhujbal. 2013. **Optimization Of Wall Thickness And Material For Minimum Heat Losses For Induction Furnace By FEA.** India: GISI.
- Purushothaman, Radhakrishnan. 2008. **Evaluation and Improvemnetof Heat Treat Furnace Model.** USA: Worcester Polytechnic Institute.
- Rais Rahmat, M. 20015. **Perancangan dan Pembuatan Tungku Heat Treatment.** Bekasi: Universitas Islam 45 Bekasi
- Rohsennow, Warren. 1998. **Handbook Of Heat Transfer.** USA: Mc Graw – Hill.



Rulmeca. **Technical Information: Project and Design Criteria for Belt Conveyor.**

Vaidya, Rohit. 2003. **Experimental Testing of A Computer Aided Heat Treatment Planning System.** USA: Worcester Polytechnic Institute.

Vert, Tom. 2016. **Refractory Material Selection for Steelmaking.** USA: Wiley

Wehr, Anna. **Service Life Extension of Stainless Steel Wire Mesh Belt for Sintering Furnace.** Air Product Inc.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### Lampiran A

Data Hasil Simulasi Material Frangible

Pre Sinter 225°C (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	1.99E+02	0.8	1.95	-4.996
2	1.97E+02	0.8	2.016	-4.996
3	1.95E+02	0.8	2.096	-4.993
4	1.92E+02	0.8	2.192	-4.987
5	1.89E+02	0.8	2.29	-4.987
6	1.87E+02	0.8	2.368	-4.981
7	1.85E+02	0.8	2.502	-4.981
8	1.84E+02	0.8	2.58	-4.99
9	1.82E+02	0.8	2.697	-4.987
10	1.80E+02	0.8	2.819	-4.984
11	1.79E+02	0.8	2.953	-4.984
12	1.79E+02	0.8	3.082	-4.979
13	1.78E+02	0.8	3.228	-4.976
14	1.77E+02	0.8	3.41	-4.984
15	1.77E+02	0.8	3.464	-4.984

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	1.99E+02	-17.147	1.962	-1.5
2	1.97E+02	-17.15	2.034	-1.5
3	1.93E+02	-17.157	2.138	-1.5
4	1.90E+02	-17.16	2.23	-1.5
5	1.88E+02	-17.167	2.308	-1.5
6	1.86E+02	-17.176	2.412	-1.5

7	1.85E+02	-17.18	2.51	-1.5
8	1.84E+02	-17.176	2.598	-1.5
9	1.83E+02	-17.18	2.686	-1.5
10	1.81E+02	-17.183	2.819	-1.5
11	1.80E+02	-17.189	2.924	-1.5
12	1.79E+02	-17.186	3.051	-1.5
13	1.79E+02	-17.183	3.188	-1.5
14	1.78E+02	-17.18	3.406	-1.5
15	1.78E+02	-17.183	3.461	-1.5

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.00E+02	0.8	1.957	-1.397
2	1.97E+02	0.8	2.045	-1.397
3	1.94E+02	0.8	2.137	-1.397
4	1.91E+02	0.8	2.226	-1.394
5	1.88E+02	0.8	2.308	-1.39
6	1.87E+02	0.8	2.38	-1.384
7	1.85E+02	0.8	2.507	-1.387
8	1.83E+02	0.8	2.598	-1.39
9	1.82E+02	0.8	2.706	-1.39
10	1.81E+02	0.8	2.826	-1.387
11	1.80E+02	0.8	2.946	-1.384
12	1.79E+02	0.8	3.056	-1.384
13	1.78E+02	0.8	3.189	-1.39
14	1.78E+02	0.8	3.401	-1.387
15	1.78E+02	0.8	3.461	-1.387



Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	1.98E+02	0.8	1.959	2.194
2	1.96E+02	0.8	2.025	2.197
3	1.92E+02	0.8	2.127	2.204
4	1.90E+02	0.8	2.226	2.207
5	1.88E+02	0.8	2.296	2.214
6	1.86E+02	0.8	2.372	2.214
7	1.85E+02	0.8	2.451	2.214
8	1.84E+02	0.8	2.53	2.21
9	1.83E+02	0.8	2.623	2.214
10	1.81E+02	0.8	2.725	2.214
11	1.80E+02	0.8	2.834	2.214
12	1.79E+02	0.8	2.943	2.21
13	1.78E+02	0.8	3.062	2.217
14	1.78E+02	0.8	3.177	2.22
15	1.77E+02	0.8	3.405	2.214
16	1.77E+02	0.8	3.464	2.214

Pre Sinter 250°C (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.22E+02	0.8	1.964	-4.99
2	2.19E+02	0.8	2.055	-4.987
3	2.16E+02	0.8	2.133	-4.984
4	2.14E+02	0.8	2.214	-4.981
5	2.12E+02	0.8	2.293	-4.978
6	2.09E+02	0.8	2.398	-4.978
7	2.07E+02	0.8	2.507	-4.981
8	2.05E+02	0.8	2.606	-4.984

9	2.04E+02	0.8	2.711	-4.984
10	2.02E+02	0.8	2.835	-4.987
11	2.01E+02	0.8	2.962	-4.984
12	2.01E+02	0.8	3.097	-4.984
13	2.00E+02	0.8	3.239	-4.984
14	1.99E+02	0.8	3.41	-4.99
15	1.99E+02	0.8	3.462	-4.993

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.23E+02	-17.16	1.957	-1.3
2	2.20E+02	-17.16	2.041	-1.3
3	2.17E+02	-17.16	2.119	-1.3
4	2.14E+02	-17.16	2.203	-1.3
5	2.11E+02	-17.166	2.293	-1.3
6	2.09E+02	-17.166	2.383	-1.3
7	2.07E+02	-17.172	2.505	-1.3
8	2.06E+02	-17.177	2.595	-1.3
9	2.05E+02	-17.172	2.682	-1.3
10	2.04E+02	-17.18	2.783	-1.3
11	2.02E+02	-17.18	2.888	-1.3
12	2.02E+02	-17.174	3.007	-1.3
13	2.01E+02	-17.174	3.158	-1.3
14	2.00E+02	-17.177	3.416	-1.3
15	2.00E+02	-17.174	3.451	-1.3

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.23E+02	0.8	1.953	-1.412
2	2.20E+02	0.8	2.033	-1.403

3	2.17E+02	0.8	2.122	-1.387
4	2.14E+02	0.8	2.207	-1.387
5	2.11E+02	0.8	2.29	-1.387
6	2.10E+02	0.8	2.375	-1.387
7	2.09E+02	0.8	2.436	-1.387
8	2.07E+02	0.8	2.528	-1.387
9	2.05E+02	0.8	2.613	-1.39
10	2.04E+02	0.8	2.718	-1.39
11	2.03E+02	0.8	2.858	-1.39
12	2.02E+02	0.8	2.978	-1.39
13	2.01E+02	0.8	3.121	-1.396
14	2.00E+02	0.8	3.251	-1.399
15	2.00E+02	0.8	3.404	-1.403
16	2.00E+02	0.8	3.464	-1.396

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.22E+02	0.8	1.959	2.207
2	2.18E+02	0.8	2.036	2.21
3	2.15E+02	0.8	2.112	2.21
4	2.13E+02	0.8	2.199	2.217
5	2.10E+02	0.8	2.292	2.217
6	2.09E+02	0.8	2.369	2.227
7	2.07E+02	0.8	2.489	2.233
8	2.05E+02	0.8	2.592	2.233
9	2.04E+02	0.8	2.698	2.233
10	2.02E+02	0.8	2.798	2.237
11	2.01E+02	0.8	2.911	2.233
12	2.00E+02	0.8	3.038	2.233

13	1.99E+02	0.8	3.224	2.23
14	1.99E+02	0.8	3.414	2.207
15	1.99E+02	0.8	3.461	2.21

Pre Sinter 275°C (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.45E+02	0.8	1.956	-5.001
2	2.42E+02	0.8	2.046	-5.001
3	2.39E+02	0.8	2.135	-5.004
4	2.36E+02	0.8	2.219	-4.998
5	2.34E+02	0.8	2.302	-4.995
6	2.31E+02	0.8	2.383	-4.995
7	2.29E+02	0.8	2.507	-4.995
8	2.27E+02	0.8	2.616	-4.99
9	2.25E+02	0.8	2.746	-4.99
10	2.24E+02	0.8	2.867	-4.984
11	2.23E+02	0.8	2.971	-4.99
12	2.22E+02	0.8	3.089	-4.984
13	2.22E+02	0.8	3.225	-4.987
14	2.21E+02	0.8	3.403	-4.998
15	2.21E+02	0.8	3.461	-4.998

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.46E+02	-17.16	1.957	-1.3
2	2.42E+02	-17.167	2.053	-1.3
3	2.38E+02	-17.167	2.153	-1.3
4	2.35E+02	-17.175	2.263	-1.3
5	2.32E+02	-17.175	2.37	-1.3

6	2.30E+02	-17.171	2.455	-1.3
7	2.29E+02	-17.178	2.533	-1.3
8	2.28E+02	-17.182	2.626	-1.3
9	2.26E+02	-17.178	2.751	-1.3
10	2.24E+02	-17.182	2.868	-1.3
11	2.23E+02	-17.185	3	-1.3
12	2.23E+02	-17.192	3.121	-1.3
13	2.22E+02	-17.192	3.259	-1.3
14	2.21E+02	-17.175	3.416	-1.3
15	2.21E+02	-17.175	3.459	-1.3

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.46E+02	0.8	1.958	-1.396
2	2.43E+02	0.8	2.044	-1.393
3	2.39E+02	0.8	2.135	-1.39
4	2.36E+02	0.8	2.233	-1.39
5	2.33E+02	0.8	2.304	-1.387
6	2.32E+02	0.8	2.386	-1.387
7	2.30E+02	0.8	2.472	-1.387
8	2.29E+02	0.8	2.54	-1.381
9	2.27E+02	0.8	2.634	-1.381
10	2.26E+02	0.8	2.757	-1.378
11	2.24E+02	0.8	2.907	-1.384
12	2.23E+02	0.8	3.014	-1.387
13	2.22E+02	0.8	3.13	-1.387
14	2.22E+02	0.8	3.271	-1.393
15	2.22E+02	0.8	3.397	-1.399
16	2.21E+02	0.8	3.461	-1.396

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.45E+02	0.8	1.963	2.197
2	2.40E+02	0.8	2.06	2.203
3	2.37E+02	0.8	2.163	2.206
4	2.33E+02	0.8	2.267	2.206
5	2.31E+02	0.8	2.38	2.213
6	2.29E+02	0.8	2.458	2.219
7	2.28E+02	0.8	2.532	2.219
8	2.27E+02	0.8	2.617	2.219
9	2.25E+02	0.8	2.707	2.219
10	2.23E+02	0.8	2.824	2.219
11	2.23E+02	0.8	2.94	2.216
12	2.22E+02	0.8	3.067	2.213
13	2.21E+02	0.8	3.193	2.213
14	2.20E+02	0.8	3.403	2.206
15	2.20E+02	0.8	3.458	2.206

Sinter 300 (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.70E+02	0.85	1.954	-4.966
2	2.67E+02	0.85	2.026	-4.96
3	2.64E+02	0.85	2.112	-4.96
4	2.61E+02	0.85	2.194	-4.95
5	2.59E+02	0.85	2.287	-4.956
6	2.56E+02	0.85	2.382	-4.956
7	2.54E+02	0.85	2.498	-4.963
8	2.52E+02	0.85	2.603	-4.956

9	2.51E+02	0.85	2.692	-4.963
10	2.49E+02	0.85	2.788	-4.963
11	2.48E+02	0.85	2.913	-4.956
12	2.47E+02	0.85	3.042	-4.96
13	2.47E+02	0.85	3.22	-4.969
14	2.46E+02	0.85	3.411	-4.969
15	2.46E+02	0.85	3.441	-4.976

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.70E+02	-17.211	1.966	-1.4
2	2.67E+02	-17.211	2.04	-1.4
3	2.64E+02	-17.211	2.124	-1.4
4	2.61E+02	-17.219	2.204	-1.4
5	2.58E+02	-17.211	2.289	-1.4
6	2.56E+02	-17.204	2.387	-1.4
7	2.55E+02	-17.211	2.494	-1.4
8	2.53E+02	-17.208	2.618	-1.4
9	2.51E+02	-17.204	2.717	-1.4
10	2.50E+02	-17.204	2.841	-1.4
11	2.48E+02	-17.204	2.995	-1.4
12	2.47E+02	-17.208	3.138	-1.4
13	2.47E+02	-17.2	3.288	-1.4
14	2.46E+02	-17.197	3.427	-1.4
15	2.46E+02	-17.193	3.478	-1.4

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.70E+02	0.85	1.963	-1.354
2	2.66E+02	0.85	2.065	-1.354

3	2.63E+02	0.85	2.167	-1.357
4	2.59E+02	0.85	2.276	-1.354
5	2.56E+02	0.85	2.396	-1.361
6	2.54E+02	0.85	2.487	-1.364
7	2.53E+02	0.85	2.543	-1.371
8	2.51E+02	0.85	2.652	-1.375
9	2.50E+02	0.85	2.761	-1.378
10	2.49E+02	0.85	2.874	-1.389
11	2.48E+02	0.85	2.986	-1.385
12	2.47E+02	0.85	3.099	-1.389
13	2.47E+02	0.85	3.261	-1.392
14	2.46E+02	0.85	3.412	-1.396
15	2.46E+02	0.85	3.475	-1.396

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.69E+02	0.85	1.959	2.216
2	2.66E+02	0.85	2.032	2.226
3	2.62E+02	0.85	2.134	2.226
4	2.58E+02	0.85	2.24	2.226
5	2.56E+02	0.85	2.352	2.229
6	2.54E+02	0.85	2.445	2.232
7	2.53E+02	0.85	2.531	2.239
8	2.51E+02	0.85	2.64	2.236
9	2.49E+02	0.85	2.759	2.232
10	2.48E+02	0.85	2.884	2.229
11	2.47E+02	0.85	3.043	2.229
12	2.46E+02	0.85	3.195	2.226
13	2.45E+02	0.85	3.347	2.223



14	2.45E+02	0.85	3.413	2.223
15	2.45E+02	0.85	3.479	2.213

Sinter 400°C (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	3.61E+02	0.8	1.956	-5.011
2	3.57E+02	0.8	2.032	-5.008
3	3.52E+02	0.8	2.135	-5.008
4	3.48E+02	0.8	2.229	-5.005
5	3.45E+02	0.8	2.318	-5.005
6	3.42E+02	0.8	2.409	-5.005
7	3.39E+02	0.8	2.524	-4.996
8	3.37E+02	0.8	2.609	-4.984
9	3.35E+02	0.8	2.71	-4.987
10	3.33E+02	0.8	2.847	-4.978
11	3.31E+02	0.8	2.965	-4.978
12	3.30E+02	0.8	3.105	-4.981
13	3.29E+02	0.8	3.251	-4.984
14	3.28E+02	0.8	3.409	-4.987
15	3.28E+02	0.8	3.461	-4.981

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	3.61E+02	-17.148	1.961	-1.4
2	3.58E+02	-17.155	2.028	-1.4
3	3.53E+02	-17.158	2.117	-1.4
4	3.48E+02	-17.161	2.222	-1.4
5	3.44E+02	-17.164	2.324	-1.4
6	3.42E+02	-17.164	2.432	-1.4

7	3.40E+02	-17.164	2.534	-1.4
8	3.38E+02	-17.171	2.61	-1.4
9	3.36E+02	-17.177	2.724	-1.4
10	3.33E+02	-17.171	2.858	-1.4
11	3.31E+02	-17.18	3.001	-1.4
12	3.30E+02	-17.177	3.144	-1.4
13	3.30E+02	-17.177	3.259	-1.4
14	3.29E+02	-17.167	3.424	-1.4
15	3.29E+02	-17.174	3.484	-1.4

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	3.62E+02	0.8	1.96	-1.414
2	3.58E+02	0.8	2.037	-1.411
3	3.52E+02	0.8	2.152	-1.411
4	3.47E+02	0.8	2.26	-1.405
5	3.44E+02	0.8	2.331	-1.395
6	3.42E+02	0.8	2.41	-1.392
7	3.40E+02	0.8	2.522	-1.386
8	3.38E+02	0.8	2.595	-1.382
9	3.36E+02	0.8	2.685	-1.382
10	3.34E+02	0.8	2.812	-1.386
11	3.32E+02	0.8	2.962	-1.386
12	3.30E+02	0.8	3.122	-1.382
13	3.30E+02	0.8	3.266	-1.386
14	3.29E+02	0.8	3.409	-1.386
15	3.29E+02	0.8	3.467	-1.386

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
----------	--------------------	--------	--------	--------

1	3.60E+02	0.8	1.957	2.197
2	3.56E+02	0.8	2.025	2.197
3	3.51E+02	0.8	2.119	2.204
4	3.47E+02	0.8	2.223	2.211
5	3.43E+02	0.8	2.317	2.221
6	3.41E+02	0.8	2.415	2.221
7	3.39E+02	0.8	2.529	2.228
8	3.37E+02	0.8	2.61	2.231
9	3.34E+02	0.8	2.714	2.234
10	3.32E+02	0.8	2.828	2.238
11	3.31E+02	0.8	2.949	2.241
12	3.30E+02	0.8	3.117	2.244
13	3.28E+02	0.8	3.282	2.238
14	3.28E+02	0.8	3.41	2.228
15	3.27E+02	0.8	3.477	2.231

Sinter 500°C (1,11); (3,1); (3,11); (5,11)

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	4.52E+02	0.85	1.966	-4.983
2	4.48E+02	0.85	2.046	-4.983
3	4.41E+02	0.85	2.163	-4.979
4	4.34E+02	0.85	2.291	-4.975
5	4.30E+02	0.85	2.392	-4.971
6	4.27E+02	0.85	2.492	-4.971
7	4.26E+02	0.85	2.544	-4.971
8	4.23E+02	0.85	2.636	-4.971
9	4.21E+02	0.85	2.749	-4.971
10	4.18E+02	0.85	2.905	-4.967

11	4.16E+02	0.85	3.022	-4.967
12	4.15E+02	0.85	3.146	-4.975
13	4.14E+02	0.85	3.282	-4.971
14	4.13E+02	0.85	3.427	-4.983
15	4.13E+02	0.85	3.483	-4.979

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	4.53E+02	-17.159	1.96	-1.3
2	4.47E+02	-17.162	2.061	-1.3
3	4.41E+02	-17.166	2.165	-1.3
4	4.36E+02	-17.177	2.259	-1.3
5	4.32E+02	-17.184	2.356	-1.3
6	4.29E+02	-17.187	2.428	-1.3
7	4.27E+02	-17.191	2.528	-1.3
8	4.24E+02	-17.194	2.643	-1.3
9	4.21E+02	-17.194	2.769	-1.3
10	4.19E+02	-17.194	2.892	-1.3
11	4.17E+02	-17.198	3.039	-1.3
12	4.15E+02	-17.205	3.168	-1.3
13	4.14E+02	-17.198	3.294	-1.3
14	4.14E+02	-17.184	3.424	-1.3
15	4.14E+02	-17.187	3.463	-1.3

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	4.54E+02	0.85	1.955	-1.399
2	4.49E+02	0.85	2.042	-1.396
3	4.42E+02	0.85	2.147	-1.389

4	4.37E+02	0.85	2.242	-1.389
5	4.33E+02	0.85	2.329	-1.385
6	4.30E+02	0.85	2.427	-1.382
7	4.27E+02	0.85	2.528	-1.382
8	4.24E+02	0.85	2.623	-1.378
9	4.22E+02	0.85	2.735	-1.375
10	4.20E+02	0.85	2.867	-1.375
11	4.18E+02	0.85	2.986	-1.375
12	4.16E+02	0.85	3.091	-1.371
13	4.15E+02	0.85	3.248	-1.375
14	4.14E+02	0.85	3.413	-1.371
15	4.14E+02	0.85	3.472	-1.371

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	4.52E+02	0.85	1.952	2.237
2	4.47E+02	0.85	2.025	2.233
3	4.41E+02	0.85	2.112	2.233
4	4.36E+02	0.85	2.214	2.233
5	4.31E+02	0.85	2.323	2.237
6	4.29E+02	0.85	2.425	2.244
7	4.26E+02	0.85	2.523	2.251
8	4.24E+02	0.85	2.614	2.255
9	4.20E+02	0.85	2.734	2.251
10	4.18E+02	0.85	2.833	2.255
11	4.16E+02	0.85	2.963	2.255
12	4.15E+02	0.85	3.113	2.255
13	4.13E+02	0.85	3.276	2.251
14	4.12E+02	0.85	3.404	2.251

15	4.12E+02	0.85	3.462	2.255
----	----------	------	-------	-------

## Lampiran B

Data Hasil Simulasi Dinding Furnace

Pre Sinter 5.5.10

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.49E+02	8.406	14.818	35.586
2	2.46E+02	8.406	14.886	33.573
3	2.43E+02	8.406	14.751	31.694
4	1.93E+02	8.406	15.02	30.486
5	1.92E+02	8.406	14.886	28.406
6	1.91E+02	8.406	14.886	26.594
7	9.00E+01	8.406	14.886	24.984
8	6.57E+01	8.406	14.953	21.428
9	4.04E+01	8.406	14.953	17.536

Pre Sinter 5.10.5

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.49E+02	-3.295	1.53	4.563
2	2.47E+02	-3.295	1.605	2.836
3	2.44E+02	-3.295	1.53	1.033
4	1.62E+02	-3.295	1.681	-1.07
5	1.60E+02	-3.295	1.605	-4.75
6	1.58E+02	-3.295	1.53	-8.505
7	5.64E+01	-3.295	1.605	-10.759
8	4.40E+01	-3.295	1.53	-12.561
9	3.35E+01	-3.295	1.681	-14.364

Pre Sinter 10.5.5

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.49E+02	4.084	16.722	38.944
2	2.41E+02	4.084	16.722	34.933
3	2.32E+02	4.084	16.858	30.65
4	1.60E+02	4.084	16.858	29.087
5	1.58E+02	4.084	16.926	27.183
6	1.57E+02	4.084	16.926	25.348
7	6.98E+01	4.084	16.994	23.988
8	5.17E+01	4.084	17.198	22.085
9	3.60E+01	4.084	17.198	20.113

#### Sinter 5.5.10

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.99E+02	8.406	15.892	35.586
2	2.95E+02	8.406	15.892	33.506
3	2.90E+02	8.406	15.691	31.493
4	2.30E+02	8.406	15.959	30.419
5	2.29E+02	8.406	15.758	28.406
6	2.28E+02	8.406	15.691	26.326
7	1.05E+02	8.406	15.825	24.984
8	7.47E+01	8.406	15.825	21.428
9	3.75E+01	8.406	15.758	16.731

#### Sinter 5.10.5

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.99E+02	-3.295	0.405	4.505
2	2.96E+02	-3.295	0.48	2.934

3	2.92E+02	-3.295	0.48	1.064
4	1.92E+02	-3.295	0.33	-1.255
5	1.90E+02	-3.295	0.33	-4.696
6	1.88E+02	-3.295	0.33	-8.736
7	6.41E+01	-3.295	0.33	-10.681
8	4.77E+01	-3.295	0.405	-12.626
9	3.50E+01	-3.295	0.031	-14.421

#### Sinter 10.5.5

Location	Value (Celsius)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	2.99E+02	4.084	17.062	39.08
2	2.89E+02	4.084	17.062	35.137
3	2.77E+02	4.084	16.858	30.582
4	1.89E+02	4.084	16.858	28.815
5	1.88E+02	4.084	16.79	27.047
6	1.86E+02	4.084	16.858	25.144
7	7.74E+01	4.084	16.994	23.784
8	5.50E+01	4.084	17.062	21.813
9	3.78E+01	4.084	16.858	20.045

### Lampiran C

Tabel Diameter Roller Berdasarkan Lebar Belt Menurut Conveyor Handbook.



**Tab.16 - Roller diameter advised**

Belt width mm	For speed $\leq 2$ m/s $\varnothing$ roller mm		
500	89		
650	89		
800	89	108	
1000	108	133	
1200	108	133	
1400	133	159	
1600	133	159	
1800	159	159	194
2000	159	194	
2200 e oltre	194		

*halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



**Jonas Martua Tambunan**, lahir di Kota Balige pada tanggal 30 Mei 1995. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan M. Tambunan dan R. br Sianturi. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formalnya dimulai dari SDN no 175802 Lumban Gaol pada tahun 2007 dan kemudian menyelesaikan pendidikan selanjutnya di SMPS Budhi Dharma Balige pada 2010. Setelah itu penulis melanjutkan dan menyelesaikan pendidikan di SMAN 2 Balige pada tahun 2013. Di tahun yang sama, penulis

diterima dan melanjutkan ke Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember lewat jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP 2713100057. Selama masa perkuliahan penulis aktif berorganisasi di dalam maupun di luar jurusan. Dalam jurusan, penulis pernah menjadi staf dan kemudian menjadi Kadiv Divisi Aplikatif BSO MTC HMMT FTI-ITS, selain itu penulis aktif dan juga menjadi pengurus dalam paguyuban MBP ITS. Di luar kampus, penulis aktif sebagai pengurus di PMK Kota Surabaya bagian Misi. Dalam bidang akademik, penulis pernah menjadi Asisten Dosen pada Mata Kuliah Matematika Rekayasa dan selama dua tahun menjadi Asisten Laboratorium Metalurgi.

Dalam hal pengalaman kerja, penulis pernah kerja praktik di PT Badak NGL bagian Technical Department, Inspection Section selama dua bulan. Kemudian selain itu penulis juga aktif sebagai volunteer pengajar dalam Kelas Ceria dan Bimbingan Belajar Kenosis.

Tugas akhir yang diambil penulis berjudul “Studi Rancang Bangun dan Temperatur Zona *Continuous Furnace* Material Frangible Cu-5wt%Sn”.

*email : jonas.tamb@gmail.com*